

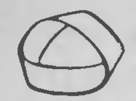
БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
выпуск 62

Р. ФЕЙНМАН

# ХАРАКТЕР ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ




$F = G\frac{mm'}{r^2}$



БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
выпуск 62

Р. ФЕЙНМАН

# ХАРАКТЕР ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ

Перевод с английского
В. П. ГОЛЫШЕВА,
Э. Л. НАППЕЛЬБАУМА

Предисловие профессора
Я. А. СМОРОДИНСКОГО



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1987

ББК 22.31
Ф36
УДК 530.1(023)

Richard Feynman

THE CHARACTER OF PHYSICAL LAW

A series of lectures recorded by the
BBC at Cornell University USA

Cox and Wyman LTD
London, 1965



**Фейнман Р.**
Ф 36 Характер физических законов: Пер. с англ.— 2-е изд., испр.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.—160 с.— (Б-чка «Квант». Вып. 62.)
45 к. 163 000 экз.

Сборник лекций, прочитанных во время традиционных Мессенджеровских чтений в Корнеллском университете (в 1964 г.) известным физиком-теоретиком Р. Фейнманом. В этих лекциях, обращаясь к очень широкой аудитории, Фейнман рассказывает о самых фундаментальных законах природы, о том, как их открывают, каковы их особенности. Во второе издание перевода (1-е — «Мир», 1968 г.) внесены некоторые редакционные изменения.

Для школьников, студентов, преподавателей.

Ф $\frac{1704020000-146}{053(02)-87}$ 165-87 ББК 22.31

## К ЧИТАТЕЛЮ

**(Предисловие ко второму русскому изданию)**

В книге, которую Вам предстоит прочесть, собраны необычные лекции. В этих лекциях рассказано о законах физики, о том, как современная наука объясняет явления в окружающем нас мире. Нельзя сказать, что сама тема необычная, напротив, об этом написано очень много, тем более что автор не очень удаляется от того, о чем рассказано в школьном учебнике физики.

Нет сомнения, что Вы знаете о законе всемирного тяготения и, скорее всего, что-то читали о теории относительности. Конечно, Вам знакомы и основные идеи теории теплоты. Почти обо всем, о чем предстоит прочесть, Вы где-нибудь читали или слышали раньше. Тем не менее это не повторение старого, и книгу следует прочесть, так как обо всем в ней написано по-другому, написано необычно: необычен автор лекций и необычно то, как автор ведет свой рассказ.

Автор Ричард Фейнман — один из самых ярких физиков нашего времени. Его имя связано с великими событиями в физике, которые произошли в конце 40-х годов. Это было время кризиса квантовой механики. Существовавшие методы квантовой механики позволяли с большим успехом описать огромное количество явлений, происходящих с атомами и молекулами, но они оказались непригодными для описания взаимодействия заряженных частиц с электромагнитным полем. Привычные для физиков расчеты давали бессмысленные бесконечные выражения, и казалось, что связь теории с опытом утрачена. И действительно, теория оказалась бессильной в описании квантовых свойств электромагнитного поля. Нужны были новые идеи, которые позволили бы объединить старую теорию электромагнитного поля (электродинамику Максвелла) с квантовой механикой релятивистских частиц. В 1947 г. произошло открытие нового пути. Его совершили три человека: Ричард Фейнман, Юлиан Швингер и Синьитиро Томонага. Совершилось рождение квантовой электродинамики, необычайно красивого и мощного раздела физики, о котором, как мы надеемся,

Вы узнаете в высшей школе*. Работы молодых тогда физиков были отмечены осенью 1965 г. Нобелевской премией (английское издание настоящей книги вышло за несколько месяцев до этого события) и открыли путь развитию теории элементарных частиц.

Фейнман — не только крупный физик, он еще и талантливый лектор, который умеет рассказать и о достижениях физиков, и о том, как физика делается. В развитии науки очень трудно понять самое главное: когда и почему человек начал задавать вопросы природе и когда он начал искать общую причину разных событий. Наверное, это произошло в Древней Греции, когда философы и естествоиспытатели (их нельзя еще было отличить друг от друга) стали обсуждать свойства чисел, свойства языков, находить первые законы природы. Они поняли, что любые утверждения надо не только проверять на практике, но и доказывать логически (а не ссылаться на волю богов или авторитет жрецов), и они научились это делать. С тех пор неисчерпаемая жажда знаний превратилась в движущую силу развития цивилизации.

В лекциях, собранных в книге, Фейнман рассказывает о том, как развивается процесс познания, как совершаются открытия. Лекции были прочитаны довольно давно, в 1964 г., в Корнеллском университете в США, университете, который окончил сам Фейнман. Лекции имели успех и потом передавались по радио и телевидению. И хотя с тех пор прошло много времени, в них почти ничего не устарело.

Развитие науки далеко не всегда идет по законам логики. В критические периоды логика рассуждений ломается, и естествоиспытатель порой сам не вполне понимает глубокий смысл свершенных перемен: понимание происходит лишь много лет спустя. Физик часто объясняет другим то, что он еще сам не вполне понимает. Фейнман даже говорил: «...Я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает...». Может быть, такое высказывание слишком категорично, но до последнего времени в квантовой механике открываются новые черты, о которых никто не знал двадцать лет назад. Рожденная наука живет своей жизнью и раскрывает перед изумленными исследователями все новые качества, о которых ее создатели не подозревали. И это относится не только к физике, но и к математике.

---

*) О квантовой электродинамике готовится к изданию книга: *Фейман Р.* КЭД — странная теория света и вещества: Пер. с англ. /Под ред. Л. Б. Окуня.— М.: Наука, 1988.— (Библиотечка «Квант», вып. 66.)

В давние времена человек придумал ряд натуральных чисел. Переход от один, два ... много к счету больших множеств был, конечно, большим достижением. Но удивляться надо тому, что этот как будто бы придуманный ряд обладает самыми разными свойствами, не менее богатыми, чем любое физическое явление. В разделе математики — теории чисел — доказываются теоремы, выдвигаются и проверяются гипотезы и даже ставятся опыты на ЭВМ. Придуманный ряд натуральных чисел обрел свою жизнь, и уже много поколений математиков изучают его свойства.

Физик знает, что даже в законах, которые считаются хорошо установленными, могут возникнуть слабые места, что в хорошо изученном явлении могут открыться новые черты. Так, закон всемирного тяготения заслужил положение самого фундаментального закона. Ньютон, сидевший (по популярной легенде, придуманной, по-видимому, Вольтером) под яблоней, догадался, что закон падения яблока и закон движения Луны один и тот же. Однако некоторые физики обратили внимание, что этот закон плохо проверен на небольших расстояниях, и нет, строго говоря, оснований отрицать, что этот закон может немного нарушаться на расстояниях в несколько метров. То, что Луна движется, подчиняясь закону Ньютона, несомненно, а падает ли яблоко по тому же закону, следует еще проверить. Даже если такие сомнения не подтвердятся, пример показывает, как могут стать шаткими основания, на которые опирается наша уверенность в понимании природы.

В последней своей лекции автор рассказывает об элементарных частицах. Сейчас мы знаем о них несравненно больше, чем двадцать лет назад, и они уже не представляются столь беспорядочным множеством. Мы сейчас знаем о кварках и о поле глюонов, которые обеспечивают взаимодействие между ними. Правда, кварков оказалось слишком много, и их стали различать по «аромату» и «цвету». Это просто названия, как бывают «Москвичи» и «Жигули», и они сами по себе ничего не означают. Ароматов бывает три, цветов тоже три, и каждому цвету и аромату отвечает пара кварков; так что всего кварков 18. Постепенно проясняется и вопрос о том, зачем в природе так много лишних «деталей», какую роль играют столь много частиц *). Сейчас все знают или, быть может, только думают, что знают, что в про-

---

*) О мире элементарных частиц можно прочесть в книге: *Окунь Л. Б.* $\alpha\beta\gamma$. . .$Z$.— М.: Наука, 1985.— (Библиотечка «Квант», вып. 45.)

цессе развития Вселенной участвовали все наборы частиц, обеспечивая устойчивость рождающихся миров и направляя Вселенную к тому замечательному состоянию, в котором мы с Вами живем и читаем книги. Законы элементарных частиц, управляющие процессами, происходящими на очень малых расстояниях (меньших, скажем, 1 ферми $=10^{-13}$ см), оказались важными в процессах рождения галактик и звезд и самой Вселенной. В огромных масштабах миллиардов парсеков (1 парсек$=3{,}26$ световых лет $\approx 3\cdot10^{16}$ м) проверяются законы, открытые в микромире. Произошло необычайное расширение поля действия, поля исследования. Сейчас строятся ускорители, которые будут создавать частицы с энергией в десятки ТэВ (терраэлектрон-вольт: 1 ТэВ$=10^{12}$ эВ). Среди них могут появиться частицы, масса которых превышает самые тяжелые атомные ядра. Невозможно даже предвидеть, какие открытия произойдут в следующие двадцать лет. Прогнозы о том, что физика завершила свое развитие, весьма далеки от истины.

Напротив, она продолжает развиваться, путь ее уходит в далекое будущее. Нельзя сомневаться, что и за видимым горизонтом человечество ждут неожиданные открытия, и вряд ли движение науки вперед когда-либо оборвется. Развитие науки и человеческий прогресс — это две стороны одного и того же процесса.

*Я. А. Смородинский*

# ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО РЕКТОРА КОРНЕЛЛСКОГО УНИВЕРСИТЕТА Д. КОРСОНА

Леди и джентльмены, я имею честь представить вам нынешнего лектора Мессенджеровских чтений профессора Ричарда Фейнмана из Калифорнийского технологического института.

Профессор Фейнман — выдающийся физик-теоретик, многое сделавший для того, чтобы навести порядок в той путанице, которой отмечено захватывающее развитие физики в послевоенный период.

Р. Фейнман выполнил свою дипломную работу в Массачусетсском технологическом институте, а затем занимался в аспирантуре Принстонского университета. Он участвовал в работах, проводившихся по так называемому Манхэттенскому проекту, сначала в Принстоне, а позже в Лос-Аламосе. В 1944 г. он получил звание ассистента профессора в Корнеллском университете, но занял эту должность только по окончании войны. Мне было интересно узнать, что говорили о нем, когда присуждалось это звание, поэтому я просмотрел протоколы попечительского совета... и не обнаружил там никаких записей об этом событии. Там имеется, однако, около двадцати записей о предоставлении отпусков, увеличении жалованья и повышении в должности. Одна запись особенно меня заинтересовала. 31 июля 1945 г. председатель физического отделения написал декану факультета искусств, что «доктор Фейнман — выдающийся педагог и исследователь, равные которому вырастают не часто». Председатель считал, что годового жалованья в три тысячи долларов маловато для выдающегося работника факультета, и рекомендовал увеличить жалованье профессору Фейнману на девятьсот долларов. Декан с не свойственной его положению щедростью и совершенно не учитывая финансовых возможностей университета вычеркнул девятьсот долларов и вписал круглое число — тысячу. Отсюда вы можете заключить, что уже тогда мы высоко ценили профессора Фейнмана! Фейнман вступил в должность в конце 1945 г. и очень плодотворно работал на факультете в течение пяти

лет. Он покинул Корнеллский университет в 1950 г. и перешел в Калифорнийский технологический институт, где и работает по сей день.

Прежде чем дать ему слово, я хочу сказать вам о нем еще кое-что. Недавно он прочел курс общей физики в Калифорнийском технологическом институте и в результате приобрел еще большую известность — теперь его лекции, отличающиеся свежим подходом к предмету, опубликованы в трех томах *). В первом томе есть фотография Фейнмана, весело играющего на бонго **). Мои друзья из Калифорнийского технологического института рассказывают, что в Лос-Анджелесе он заменяет ударника в эстрадном оркестре, однако сам Фейнман это отрицает. Другая его специальность — сейфы. Рассказывают, что однажды он, подобрав шифр замка, открыл сейф в секретном учреждении, забрал секретные документы и оставил записку: «Угадай, кто?» Я мог бы рассказать вам, как он учил испанский язык перед тем, как ехать с лекциями в Бразилию, но не стану.

Я думаю, что этих сведений вам будет достаточно, и теперь разрешите мне сказать, что я рад вновь приветствовать профессора Фейнмана в стенах Корнеллского университета. Его лекции посвящены характеру физических законов, а тема его первой лекции: «Пример физического закона — закон тяготения».

---

*) В русском переводе они изданы в 1965—1967 гг. в девяти выпусках под названием «Фейнмановские лекции по физике».— *Примеч. ред.*

**) Бонго — маленькие барабаны, на которых играют пальцами.— *Примеч. пер.*

# ПРИМЕР ФИЗИЧЕСКОГО ЗАКОНА — ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ

Как ни странно, но когда меня (изредка) приглашают играть на бонго, ведущий не считает нужным объявить, что я занимаюсь еще и теоретической физикой. Я объясняю это тем, что искусство мы уважаем больше, чем науку. Художники Возрождения говорили, что интересовать человека должен прежде всего он сам, однако в мире немало других интересных предметов. Ведь и художники любуются закатами, волнами в океане, хороводом звезд на небе... Поэтому иногда не мешает поговорить и о таких вещах. Созерцая их, мы испытываем эстетическое наслаждение. Вместе с тем в явлениях природы есть формы и ритмы, недоступные глазу созерцателя, но открытые глазу аналитика. Эти формы и ритмы мы называем физическими законами. В своих лекциях я хочу поговорить об особенностях физического закона вообще — поднявшись, если хотите, на одну ступеньку выше самих законов. Передо мной все время будет картина природы, которая возникает после подробнейшего ее анализа, но говорить я буду лишь о самых общих, самых крупных мазках этой картины.

Конечно, подобная тема слишком общая и поневоле располагает к философствованию — начинаешь говорить так расплывчато, что понять тебя может всякий. И тогда считается, что ты решаешь глубокие философские вопросы. Я постараюсь говорить конкретнее, ибо считаю, что мысль простая, но выраженная честно, полезнее туманных намеков. Поэтому в первой лекции, не вдаваясь в общие рассуждения, я просто расскажу об одном физическом законе, дабы вы имели хоть один пример того, о чем впоследствии пойдет отвлеченный разговор. К этому примеру я буду обращаться снова и снова: чтобы проиллюстрировать свою мысль или сделать реальностью то, что иначе могло бы превратиться в абстракцию. В качестве такого примера я выбрал явление гравитации — закон всемирного тяготения. Почему именно его — не знаю. Может быть, потому, что этот великий закон был открыт одним из первых и имеет ин-

тересную историю. Вы скажете: «Да, но это старая история, а мне хотелось бы услышать что-нибудь о более современной науке». Может быть, более новой, но не более современной. Современная наука лежит в том же самом русле, что и закон всемирного тяготения. Другими словами, вы просто хотите услышать о более поздних открытиях. Меня же совсем не тяготит перспектива рассказывать вам о законе всемирного тяготения, потому что, описывая его историю, пути и методы его открытия, его основные особенности, я останусь человеком вполне современным.

Этот закон называли «величайшим обобщением, достигнутым человеческим разумом». Но уже из вступительных слов вы, наверное, поняли, что меня интересует не столько человеческий разум, сколько чудеса природы, которая может подчиняться таким изящным и простым законам, как закон всемирного тяготения. Поэтому мы будем говорить не о том, как мы умны, что открыли этот закон, но о том, как мудра природа, которая соблюдает его.

Закон тяготения заключается в том, что два тела действуют друг на друга с силой, которая обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и прямо пропорциональна произведению их масс. Математически мы можем выразить этот великий закон формулой

$$F = G\frac{mm'}{r^2}$$

— некоторая постоянная умножена на произведение двух масс и поделена на квадрат расстояния. Теперь, если я напомню, что под действием силы тело ускоряет свое движение и изменение скорости за секунду обратно пропорционально массе, т. е. скорость меняется тем медленнее, чем больше масса, то я скажу все, что нужно сказать о законе тяготения. Все остальное — математические следствия этих двух фактов. Но я знаю, что нематематику трудно увидеть все такие следствия, и потому постараюсь коротко рассказать вам об истории открытия, о некоторых его следствиях, о том, как оно повлияло на историю науки, о тех тайнах, которые освещает этот закон, об уточнениях, сделанных Эйнштейном, и, возможно, о связи этого закона с другими законами физики.

Вкратце история его такова. Еще древние, наблюдая за движением планет на небе, догадались, что все они, вместе с Землей, «ходят» вокруг Солнца. Позднее, когда люди забыли то, о чем знали прежде, это открытие заново сделал Коперник. И тогда возник новый вопрос: как именно пла-

неты ходят вокруг Солнца, каково их движение? Ходят ли они по кругу и Солнце находится в центре или они движутся по какой-нибудь другой кривой? Как быстро они движутся? И так далее. Выяснилось это не так скоро. После Коперника снова настали смутные времена и разгорелись великие споры о том, ходят ли планеты вместе с Землей вокруг Солнца или Земля находится в центре Вселенной. Тогда человек по имени Тихо Браге *) придумал, как можно ответить на этот вопрос. Он решил, что нужно очень внимательно следить за тем, где появляются на небе планеты, точно это записывать и тогда уже выбирать между двумя враждебными теориями. Это и было началом современной науки, ключом к правильному пониманию природы — наблюдать за предметом, записывать все подробности и надеяться, что полученные таким способом сведения послужат основой для того или иного теоретического истолкования. И вот Тихо Браге, человек богатый, владевший островом поблизости от Копенгагена, оборудовал свой остров большими бронзовыми кругами и специальными наблюдательными пунктами и записывал ночь за ночью положения планет. Лишь ценой такого тяжелого труда достается нам любое открытие.

Когда все эти данные были собраны, они попали в руки Кеплера **), который и пытался решить, как движутся планеты вокруг Солнца. Он искал решение методом проб и ошибок. Однажды ему показалось, что он уже получил ответ: он решил, что планеты движутся по кругу, но Солнце лежит не в центре. Потом Кеплер заметил, что одна из планет, кажется Марс, отклоняется от нужного положения на 8 угловых минут, и понял, что полученный им ответ неверен, так как Тихо Браге не мог допустить такую большую ошибку. Полагаясь на точность наблюдений, он решил пересмотреть свою теорию и в конце концов обнаружил три факта.

Сначала он установил, что планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам и Солнце находится в одном из фокусов. Эллипс — это кривая, о которой знают все художники, потому что она представляет собой растянутый круг. Дети тоже знают о нем: им рассказывали, что если продеть в кольцо бечевку, закрепить ее концы и вставить в кольцо карандаш, то он опишет эллипс (рис. 1).

---

*) Тихо Браге (1546—1601) — датский астроном.

**) Иоганн Кеплер (1571—1630) — немецкий астроном и математик, был помощником Браге.

Две точки $A$ и $B$ — фокусы. Орбита планеты — эллипс. Солнце находится в одном из фокусов. Возникает другой вопрос: как движется планета по эллипсу? Идет ли она быстрее, когда находится ближе к Солнцу? Замедляет ли движение, удаляясь от него? Кеплер ответил и на этот вопрос (рис. 2).

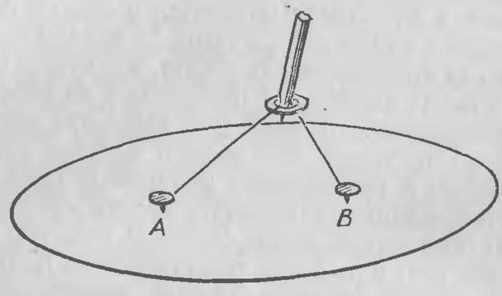



Рис. 1

Он обнаружил, что если взять два положения планеты, отделенных друг от друга определенным промежутком времени, скажем тремя неделями, потом взять другую часть орбиты и там — тоже два положения планеты, разделенных тремя неделями, и провести линии (ученые называют их радиус-векторами) от Солнца к планете, то площадь, за-

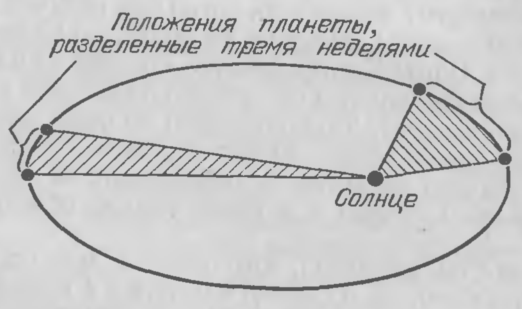



Рис. 2

ключенная между орбитой планеты и парой линий, которые отделены друг от друга тремя неделями, всюду одинакова, в любой части орбиты. А чтобы эти площади были одинаковы, планета должна идти быстрее, когда она ближе к Солнцу, и медленнее, когда она далеко от него.

Еще через несколько лет Кеплер сформулировал третье правило, которое касалось не движения одной планеты во-

круг Солнца, а связывало движения различных планет друг с другом. Оно гласило, что время полного оборота планеты вокруг Солнца зависит от величины орбиты и пропорционально квадратному корню из куба этой величины. А величиной орбиты считается диаметр, пересекающий самое широкое место эллипса.

Так Кеплер открыл три закона, которые можно свести в один, если сказать, что *орбита планеты представляет собой эллипс; за равные промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равные площади и время (период) обращения планеты вокруг Солнца пропорционально величине орбиты в степени три вторых, т. е. квадратному корню из куба величины орбиты.* Эти три закона Кеплера полностью описывают движение планет вокруг Солнца.

Спросим себя: что заставляет планеты двигаться вокруг Солнца? Во времена Кеплера некоторые люди отвечали, что позади планет сидят ангелы, машут крыльями и толкают планеты по орбитам. Позднее вы увидите, что этот ответ не так уж далек от истины. С той только разницей, что «ангелы» сидят в другом месте и толкают планету к Солнцу.

Тем временем Галилей исследовал законы движения самых обычных предметов, которые были у него под рукой. Изучая эти законы, производя различные опыты, чтобы выяснить, как скатываются шарики по наклонной плоскости, как качаются маятники и т. д., Галилей открыл великий принцип, который называется принципом инерции и состоит вот в чем: если на предмет ничто не действует и он движется с определенной скоростью по прямой линии, то он будет двигаться с той же самой скоростью и по той же самой прямой линии вечно. Как ни странно это звучит для тех, кто пытался заставить шарик вечно катиться по полу, но если бы эта идеализация была верна и на шарик ничто не действовало (например, трение о пол), то шарик все время катился бы с постоянной скоростью.

Затем наступила очередь Ньютона, который раздумывал над таким вопросом: а если шарик не катится по прямой линии, что *тогда*? И он ответил так: для того чтобы хоть как-нибудь изменить скорость, нужна сила. Например, если вы подталкиваете шарик в том направлении, в каком он катится, то он покатится быстрее. Если вы заметили, что он свернул в сторону, значит, сила действовала сбоку. Силу можно измерить произведением двух величин. Насколько меняется скорость за небольшой промежуток времени? Эта величина называется ускорением. Если ее умножить на коэффициент, называемый массой предмета, то

произведение и будет силой. Силу можно измерить. Например, если мы привяжем к веревке камень и станем крутить его над головой, то почувствуем, что за веревку надо тянуть. Правда, когда камень летает по кругу, величина скорости не изменяется — зато изменяется ее направление. Значит, нужна сила, которая все время тянула бы камень к центру, и сила эта пропорциональна массе. Если мы возьмем два разных предмета и станем раскручивать сначала один, а потом другой с той же самой скоростью, то во втором случае потребуется сила, во столько раз большая,

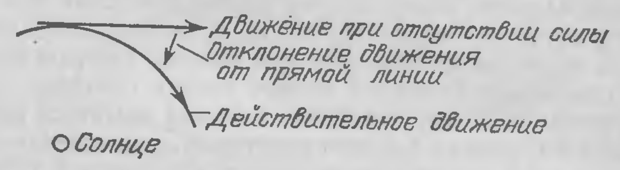



Рис. 3

во сколько масса второго предмета больше массы первого. Таким образом, определив силу, необходимую для того, чтобы изменить скорость тела, мы можем вычислить его массу. Поэтому, решил Ньютон, планете, вращающейся вокруг Солнца, *не нужна сила, чтобы двигаться вперед;* если бы никакой силы не было, планета летела бы по касательной. Но на самом деле планета летит не по прямой. Она все время оказывается не в том месте, куда попала бы, если бы летела свободно, а ближе к Солнцу (рис. 3). Другими словами, ее скорость, ее движение отклоняются в сторону Солнца. Поэтому ангелы должны так махать крыльями, чтобы все время подталкивать планету к Солнцу.

Но свободное движение не имеет никакой видимой причины. Почему предметы способны вечно лететь по прямой линии, мы не знаем. Происхождение закона инерции до сих пор остается загадкой. В отличие от ангелов свободное движение существует, и, чтобы искривить его, нужна сила. Стало ясно, что источник этой силы находится где-то около Солнца. И Ньютону удалось доказать, что второй закон Кеплера — закон равенства площадей — прямо вытекает из той простой идеи, что все изменения в скорости направлены к Солнцу. Даже в случае эллиптической орбиты. В следующей лекции я попытаюсь подробно объяснить вам, как это можно сделать.

Этот закон укрепил Ньютона в мысли, что сила, действующая на планеты, направлена к Солнцу и что, зная, как

период обращения разных планет зависит от расстояния до Солнца, можно будет определить, как ослабляется сила с расстоянием. Он нашел, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

До сих пор Ньютон не сказал ничего нового — он лишь повторил другими словами то, что сказал до него Кеплер. Один закон Кеплера равнозначен утверждению, что сила направлена к Солнцу, а другой — утверждению, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Люди рассматривали в телескоп Юпитер со спутниками, обращающимися вокруг него, и им это напоминало маленькую Солнечную систему. Все выглядело так, будто спутники притягиваются к Юпитеру. Луна тоже вращается вокруг Земли и притягивается к ней точно таким же образом. Естественно, возникла мысль, что притяжение действует повсюду. Оставалось лишь обобщить эти наблюдения и сказать, что все тела притягивают друг друга. А значит, Земля должна притягивать Луну так же, как Солнце притягивает планеты. Но известно, что Земля притягивает и обычные предметы: вы, например, прочно сидите на стуле, хотя вам, может быть, и хотелось бы летать по воздуху. Тяготение предметов к Земле было явлением, хорошо известным. Ньютон предположил, что Луну на орбите удерживают те же силы, которые притягивают предметы к Земле.

Насколько падает Луна за секунду, нетрудно сообразить потому, что вы знаете размеры орбиты, знаете, что Луна обходит Землю за месяц и, подсчитав, сколько она проходит за секунду, сможете узнать, насколько круг лунной орбиты отклоняется за секунду от прямой линии, по которой бы летела Луна, если бы Земля ее не притягивала. Эта величина немногим больше 1,25 мм. Луна в 60 раз дальше от центра Земли, чем мы (мы удалены от центра Земли на 6400 км, а Луна — на 378000 км). Значит, если закон обратнопропорциональной зависимости от квадрата расстояния правилен, то предмет у поверхности Земли при падении должен пролетать за секунду 1,25 мм$\times 60^2$, потому что на орбите Луны предметы должны притягиваться в $60\times 60$ раз слабее. Итак, 1,25 мм$\times$3600 — это примерно 5 м. Измерения Галилея показали, что, падая у поверхности Земли, тела пролетают в секунду 5 м. Это означало, что Ньютон встал на верную дорогу, потому что, если раньше было известно два независимых факта: во-первых, период вращения Луны и величина ее орбиты и, во-вторых, расстояние, которое пролетает падающее тело у поверхности Земли, то теперь эти факты оказались тесно связанными. Эта

увлекательная проверка показала, что с теорией Ньютона все обстоит благополучно.

Затем Ньютон сделал еще несколько предсказаний. Ему удалось вычислить, какую форму должна иметь орбита, если закон обратной пропорциональности квадрату расстояния справедлив; он нашел, что орбита должна быть эллипсом, и получил третье подтверждение своего закона. Вдобавок ему удалось объяснить и некоторые другие явления.

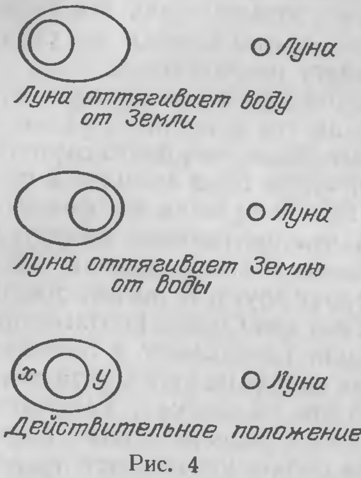


Рис. 4

Во-первых, приливы. Приливы вызваны тем, что Луна сама притягивает Землю и ее океаны. Так думали раньше, но вот что оказалось необъяснимым: если Луна притягивает воды и поднимает их над ближней стороной Земли, то за сутки происходил бы лишь один прилив — прямо под Луной (рис. 4). На самом же деле, как мы знаем, приливы повторяются примерно через 12 часов, т. е. два раза в сутки. Была и другая школа, которая придерживалась противоположных взглядов. Ее приверженцы считали, что Луна притягивает Землю, а вода за ней не успевает. Ньютон первым понял, что происходит на самом деле: притяжение Луны одинаково действует на Землю и на воду, если они одинаково удалены. Но вода в точке $y$ ближе к Луне, чем Земля, а в точке $x$ — дальше. В $y$ вода притягивается к Луне сильнее, чем Земля, а в $x$ — слабее. Поэтому получается комбинация двух предыдущих картинок, которая и дает двойной прилив.

Фактически Земля делает то же самое, что и Луна — она движется по кругу. Сила, с которой Луна действует на Землю, уравновешивается — но чем? Как Луна ходит по кругу, чтобы уравновесить притяжение Земли, точно так же ходит по кругу и Земля. Обе они обращаются вокруг общего центра, и силы на Земле уравновешены так, что вода в $x$ притягивается Луной слабее, в $y$ — сильнее и в обоих местах вода вспучивается. Так были объяснены приливы и почему они происходят дважды в сутки. Прояснилось и многое другое: как Земля стала круглой из-за того, что все ее части притягивали друг друга, как она оказалась не

совсем круглой из-за того, что вращается и наружные части ее стремятся прочь сильнее, чем внутренние, почему шарообразны Луна и Солнце и т. д.

С развитием науки измерения производились все точнее и подтверждения ньютоновских законов становились все более убедительными. Первые точные измерения касались спутников Юпитера. Казалось бы, если тщательно наблюдать за их обращением, то можно убедиться, что все происходит согласно Ньютону. Однако выяснилось, что это не так. Спутники Юпитера появлялись в расчетных точках то на 8 мин раньше, то на 8 мин позже, чем полагалось бы согласно законам Ньютона. Обнаружилось, что они опережают график, когда Юпитер сближается с Землей, и отстают, когда Юпитер и Земля расходятся,— очень странное явление. Рёмер *), убежденный в правильности закона тяготения, пришел к интересному выводу, что для путешествия от спутников Юпитера до Земли свету требуется определенное время, и, глядя на спутники Юпитера, мы видим их не там, где они находятся сейчас, а там, где они были несколько минут назад — столько минут, сколько требуется свету, чтобы дойти до нас. Когда Юпитер ближе к нам, свет приходит быстрее, а когда Юпитер дальше — свет идет дольше; поэтому Рёмеру пришлось внести поправку в наблюдения на эту разницу во времени, т. е. учесть, что иногда мы делаем эти наблюдения раньше, а иногда позже. Отсюда ему удалось определить скорость света. Так было впервые установлено, что свет распространяется не мгновенно.

История этого открытия показывает, что если какой-то закон верен, то при его помощи можно открыть другой закон. Когда мы убеждены в правильности некоторого закона, но что-то в наших наблюдениях с ним не вяжется, это может указать нам на другое, неизвестное явление. Если бы мы не знали закона тяготения, потребовалось бы гораздо больше времени, чтобы определить скорость света, ибо мы не знали бы, чего ожидать от спутников Юпитера. Этот процесс разросся в целую лавину открытий. Каждое новое открытие давало толчок следующему, и лавина эта движется вот уже 400 лет — в наши дни так же быстро, как и прежде.

Возникла еще одна проблема: планеты не должны двигаться по эллипсам, потому что, согласно законам Ньютона, они не только притягиваются Солнцем, но и притягивают друг друга — слабо, но все же притягивают, и это слег-

---

*) Олаф Рёмер (1644—1710) — датский астроном.

ка изменяет их движение. Уже были известны большие планеты — Юпитер, Сатурн, Уран — и было подсчитано, насколько они должны отклоняться от своих совершенных кеплеровских орбит-эллипсов за счет взаимного притяжения. Когда эти расчеты были закончены и проверены наблюдениями, обнаружилось, что Юпитер и Сатурн движутся

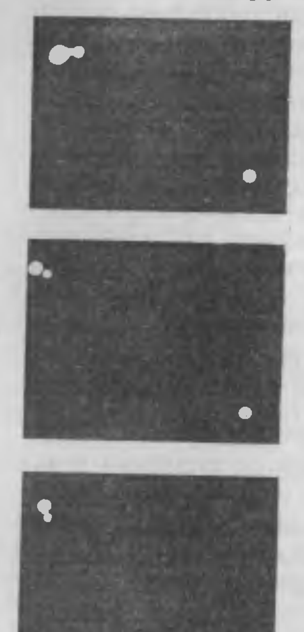


Рис. 5. Три фотографии двойной звезды, сделанные в разное время

21 июля 1908 г.

Сентябрь 1915 г.

10 июля 1920 г.

в полном согласии с расчетами, а с Ураном творится что-то странное. Казалось бы, еще повод усомниться в законах Ньютона; но главное — не падать духом! Два человека, Адамс и Леверье *), которые выполнили эти расчеты независимо друг от друга и почти одновременно, предположили, что на движение Урана влияет невидимая планета. Они послали письма в обсерватории с предложением: «Направьте ваш телескоп туда-то и вы увидите неизвестную планету». «Что за чепуха,— сказали в одной из обсерваторий,— какому-то мальчишке попала в руки бумага и карандаш, и он

*) Джон Кауч Адамс (1819—1892) — английский математик и астроном; Урбен Леверье (1811—1877) — французский астроном. (Вы можете почитать о них в книге: *Саймон Т.* Поиски планеты Икс.— М.: Мир, 1966.— *Примеч. ред.*)

указывает нам, где искать новую планету». В другой обсерватории дирекция была легче на подъем — и там открыли Нептун!

Позже, в начале XX века, выяснилось, что движение планеты Меркурий не совсем правильно. Это вызвало большие волнения и было объяснено только тогда, когда Эйнштейн доказал, что законы Ньютона не совсем точны и надо их несколько изменить.

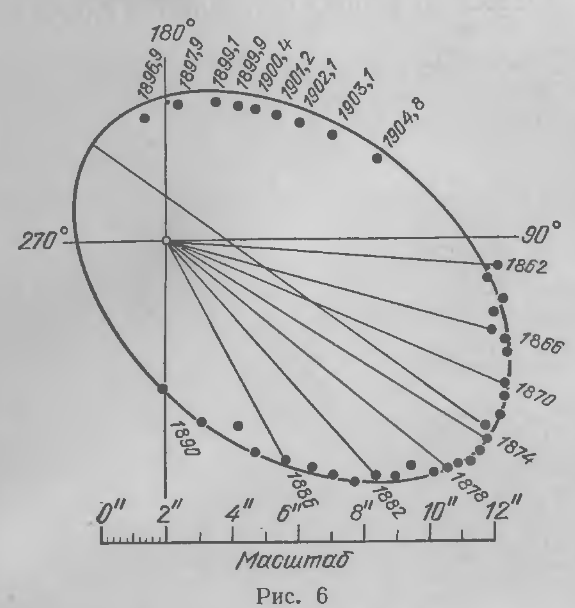



Рис. 6

Возникает вопрос: везде ли действуют эти законы? Выполняются ли они за пределами Солнечной системы? Так вот, рис. 5 показывает, что закон тяготения действует не только в пределах Солнечной системы. Здесь вы видите три фотографии так называемой двойной звезды. На фотографии попала еще одна звезда, и вы можете убедиться, что вращается действительно двойная звезда, а не рамка кадра, хотя сделать это на астрономической фотографии было бы совсем нетрудно. Эти две звезды и в самом деле вращаются, и их орбита изображена на рис. 6. Совершенно ясно, что они притягивают друг друга и движутся по эллипсам так, как это и должно происходить. Здесь отмечено последовательное положение звезд в различные моменты времени; звезды движутся по часовой стрелке. Все это кажется прек-

расным до тех пор, пока мы не замечаем, что центр орбиты расположен не в фокусе эллипса, а несколько смещен. Значит, что-то неправильно в законе? Нет, просто орбита сфотографирована не анфас, мы смотрим на нее под острым углом. Если вы нарисуете на бумаге эллипс, отметите его фокус и будете смотреть на бумагу под острым углом, то увидите проекцию этого эллипса и фокус проекции не будет совпадать с фокусом самого эллипса. Орбита наклонена в пространстве и именно поэтому выглядит так странно.

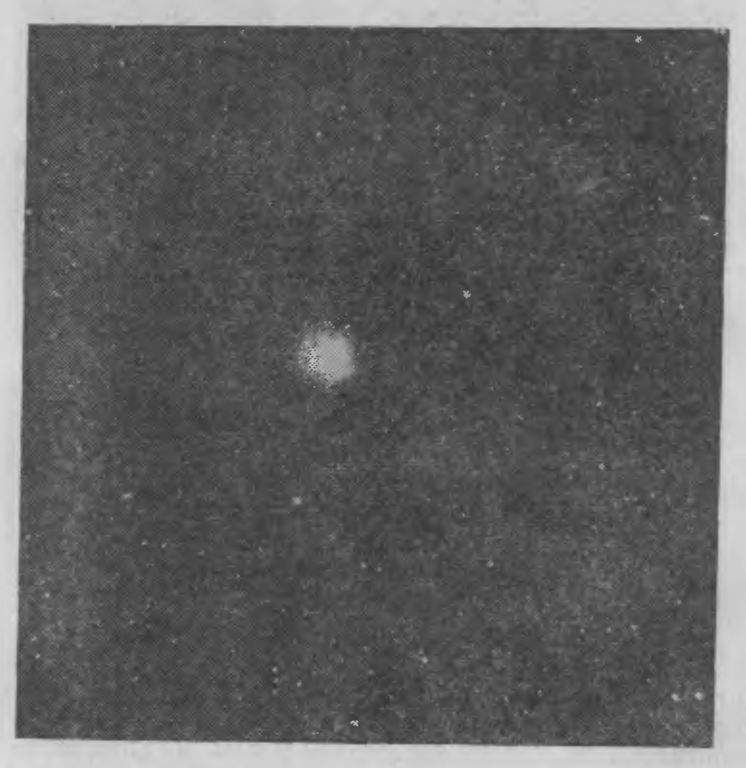


Рис. 7. Шаровое звездное скопление

А что происходит на больших расстояниях? Эта сила действует между двумя звездами; но будет ли она действовать на расстояниях, которые не в два и не в три, а во много раз превосходят диаметр Солнечной системы? На рис. 7 показан объект, который в 100 000 раз больше, чем Солнечная система; это огромное скопление звезд. Большое бе-

лое пятно — не сплошное; оно кажется таким, потому что наши несовершенные инструменты не позволяют разглядеть в нем мелкие детали. На самом же деле оно состоит из очень-очень мелких пятнышек — обычных звезд, и вовсе



Рис. 8. Спиральная галактика

не слипшихся, а сильно удаленных друг от друга, движущихся взад и вперед в этом большом шаровом скоплении. Это одно из самых прекрасных явлений на небе — такое же прекрасное, как морские волны и закаты. Размещение материала в скоплении совершенно ясно указывает, что звезды в нем также связаны взаимным тяготением. Зная

примерно расстояние до этой галактики и размещение материала в ней, мы можем приблизительно определить закон сил, действующих между звездами,— приблизительно определить, что и здесь они обратно пропорциональны



Рис. 9. Скопление галактик

квадрату расстояния. Точность этих измерений и выкладок, конечно, не может сравниться с точностью, какую мы получаем в Солнечной системе.

Тяготение действует и на еще больших расстояниях. Наше звездное скопление выглядит незаметной точкой на рис. 8, где показана типичная галактика. И опять-таки

ясно, что эта галактика держится как единое целое благодаря какой-то силе. А никакой другой силы, кроме тяготения, здесь предположить нельзя. Когда мы переходим к таким масштабам, мы уже не можем проверить справедливость ньютоновского закона. Но несомненно, что в таких гигантских звездных образованиях — в этих галактиках, которые простираются на 50—100 тысяч световых лет, тогда как расстояние от Солнца до Земли составляет только 8 световых минут,— даже на таких огромных расстояниях действуют силы тяготения. Рис. 9 свидетельствует о том, что силы тяготения простираются еще дальше. Это так называемое скопление галактик. Все они собраны в один ком, как и звезды, только этот ком составлен не из звезд, а из «крошек» вроде той, которую вы видите на рис. 8.

Это чуть ли не одна сотая, а может быть, и десятая часть известной нам Вселенной, где мы имеем прямые свидетельства существования сил тяготения. Таким образом, притяжение Земли не имеет границ, хотя в газетах и пишут порой, что такое-то тело освободилось от оков земного притяжения. Притяжение становится все слабее и слабее — оно обратно пропорционально квадрату удаления от Земли: каждый раз, когда расстояние до Земли увеличивается вдвое, сила тяготения падает вчетверо и в конце концов теряется в переплетении более сильных полей тяготения других звезд. Вместе с соседними звездами Земля притягивает другие звезды, и они образуют Галактику. Галактика притягивает другие галактики и вместе они образуют скопление — систему галактик. Таким образом, притяжение Земли нигде не кончается, но убывает медленно и строго закономерно, может быть, до самых пределов Вселенной.

Закон тяготения отличается от многих других законов. Ясно, что он играет большую роль в механике Вселенной. И покуда речь идет о Вселенной, этот закон всюду находит практическое применение. Но на Земле, как ни странно, закон тяготения дает нам гораздо меньше практически полезных сведений, чем другие законы физики. Только в этом смысле не типичен выбранный мной пример. Кстати говоря, невозможно выбрать такой пример, который был бы типичен во всех отношениях. Это удивительное свойство нашего мира. Единственные практические приложения этого закона, которые мне приходят на ум, это пожалуй, некоторые методы геологической разведки, предсказание приливов и в последнее время расчет движения искусственных спутников и межпланетных станций. Да, и еще одно современное приложение: закон Ньютона позво-



Рис. 10. Газовые туманности (в созвездии Лебедя)

ляет заблаговременно вычислять положения планет астрологам, которые публикуют свои гороскопы в журналах. Поистине мы живем в удивительном мире: все новейшие достижения человеческой мысли используются только для того, чтобы разнообразить чепуху, существующую вот уже две тысячи лет.

Теперь я расскажу, где именно тяготение существенно влияет на жизнь Вселенной. Один из интересных в этом смысле примеров — образование звезд. На рис. 10 показаны газообразные туманности внутри нашей Галактики. Это не скопление звезд, это газ. Черные пятнышки — места, где газ сжался и уплотнился за счет притяжения. Процесс этот, может быть, начинается с ударных волн, но потом благодаря притяжению газ стягивается все плотнее и плотнее и образуются большие шаровые тучи газа и пыли. По мере уплотнения они разогреваются все больше и больше, начинают светиться и превращаются в звезды.

Звезды рождаются из газа, который чересчур сжался под действием притяжения. Иногда звезды взрываются, выбрасывают пыль и газы, потом пыль и газы снова собираются и снова образуют звезды — все это похоже на вечное движение.

Как я уже сказал, тяготение действует на огромных расстояниях. Но Ньютон утверждал, что взаимно притягиваются все предметы. А правда ли, что любые два предмета притягивают друг друга? Можем ли мы сами поставить такой опыт, а не гадать, глядя на небо, притягиваются ли планеты? Такой прямой опыт сделал Кавендиш *) при помощи прибора, который показан на рис. 11. Идея состояла в том, чтобы подвесить на очень тонкой кварцевой нити стержень с двумя шарами и затем поднести к ним сбоку два больших свинцовых шара, как показано на рисунке. Притяжение шаров слегка перекрутит нить — слегка, потому что силы притяжения между обычными предметами очень слабы. Силу притяжения между двумя шарами можно измерить. Кавендиш назвал свой опыт «взвешиванием Земли». Педантичный и осторожный преподаватель наших дней не позволит студентам так выразиться; нам пришлось бы сказать «измерение массы Земли». При помощи такого прибора Кавендишу удалось непосредственно измерить силу, расстояние и величину обеих масс и, таким образом, определить постоянную тяготения $G$. Вы скажете: «Взвешивание Земли представляет собой почти такую же задачу. Мы зна-

*) Генри Кавендиш (1731—1810) — английский физик и химик.

ем силу притяжения, знаем массу объекта, который притягивается, и знаем, насколько он удален, но мы не знаем ни массы Земли, ни постоянной тяготения, а только их произведение». Измерив постоянную и зная, как Земля притягивает предметы, мы сможем вычислить ее массу.

Этот опыт впервые позволил косвенно определить, насколько тяжел, массивен шар, на котором мы живем. Результат его невольно вызывает удивление, и я думаю, что именно поэтому Кавендиш назвал свой опыт «взвешиванием Земли», а не «определением постоянной уравнения тяготения». Между прочим, он одновременно взвешивал и Солнце и все остальное, потому что притяжение Солнца определяется точно таким же способом.

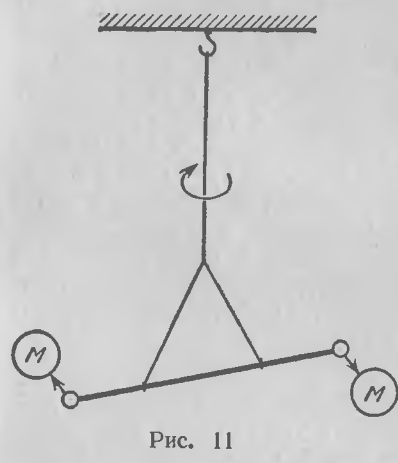


Рис. 11

Интересно было проверить закон тяготения еще с одной стороны: пропорционально ли притяжение массе. Мы знаем, что ускорение прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе. Поэтому если сила притяжения в точности пропорциональна массе, то два тела с разной массой должны одинаково менять свою скорость в поле тяготения. Иначе говоря, два различных предмета в вакууме, независимо от их массы, за одинаковое время пролетят по направлению к Земле одинаковые расстояния. Такие опыты ставил еще Галилей на падающей башне в Пизе. Это означает, например, что какая-нибудь вещь внутри искусственного спутника Земли будет двигаться точно по такой же орбите, как сам спутник, т. е. будет парить внутри него. И все это — следствие того факта, что сила пропорциональна массе, а ускорение обратно пропорционально массе.

Насколько точно это утверждение? На опыте его проверил Этвеш *) в 1909 г., а впоследствии более тщательно — Дикке **). Теперь мы знаем с точностью до одной десяти-

*) Роланд Этвеш (1848—1919) — венгерский физик.
**) Роберт Генри Дикке — современный американский физик.

миллиардной, что сила пропорциональна массе. Как удалось добиться такой точности? Предположим, вы хотите определить, в какой мере подчиняется этому правилу притяжение Солнца. Вы знаете, что Солнце притягивает всех нас. Оно притягивает Землю, но, предположим, вы хотите знать, в точности ли это притяжение пропорционально массе. Сначала опыт был проделан над сандаловым деревом, потом экспериментировали с медью и свинцом, а теперь пробуют на полиэтилене. Земля вращается вокруг Солнца, поэтому инерция отбрасывает земные тела от Солнца тем сильнее, чем больше инерция. Но, согласно закону тяготения, тела притягиваются к Солнцу — и тем сильнее, чем больше их масса. Поэтому если они притягиваются к Солнцу не в той же пропорции, в какой отбрасываются инерцией, то один предмет будет, например, стремиться к Солнцу, а другой — прочь от него. И тогда, прикрепив эти два предмета к коромыслу Кавендиша, мы увидим, что оно повернется по направлению к Солнцу и перекрутит кварцевую нить. На самом деле, однако, нить не перекручивается, и, с той точностью, которую дает этот опыт, мы знаем, что притяжение двух предметов строго пропорционально центробежному эффекту, который обусловлен инерцией. Таким образом, сила притяжения объекта пропорциональна коэффициенту инерции, или, другими словами, массе.

И вот что еще интересно. Обратнопропорциональная зависимость от квадрата расстояния встречается и в других законах, например в законах электричества. Электрические силы также обратно пропорциональны квадрату расстояния, но уже между зарядами, и невольно возникает мысль, что в этой закономерности таится глубокий смысл. До сих пор никому не удалось представить тяготение и электричество как два разных проявления одной и той же сущности. Сегодня наши физические теории, законы физики — множество разрозненных частей и обрывков, плохо сочетающихся друг с другом. Физика еще не превратилась в единую конструкцию, где каждая часть — на своем месте. Пока что мы имеем множество деталей, которые трудно подогнать друг к другу. Вот почему в этих лекциях я вынужден говорить не о том, что такое *закон* физики, а о том, что роднит различные законы; мы плохо понимаем их связь. Но интересно, что у них все же есть некоторые общие черты. Обратимся к законам электричества.

Сила и тут изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, но разница в величине электрических сил и сил тяготения поразительна. Пытаясь установить общую

природу тяготения и электричества, мы обнаруживаем такое превосходство электрических сил над силами тяготения, что трудно поверить, будто у тех и у других один и тот же источник. Как можно говорить, что одно действует сильнее другого? Ведь все зависит от того, какова масса и каков заряд. Рассуждая о том, насколько сильно действует тяготение, вы не вправе говорить: «Возьмем массу такой-то величины», потому что вы выбираете ее сами. Но если мы возьмем то, что предлагает нам сама Природа (ее собственные числа и меры, которые не имеют ничего общего с нашими дюймами, годами, с нашими мерами), тогда мы сможем сравнивать. Мы возьмем элементарную заряженную частицу, такую, например, как электрон. Две элементарные частицы, два электрона, за счет электрического заряда отталкивают друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, а за счет гравитации притягиваются друг к другу опять-таки с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния.

Вопрос: каково отношение силы тяготения к электрической силе? Тяготение относится к электрическому отталкиванию, как единица к числу с 42 нулями. Это вызывает глубочайшее недоумение. Откуда могло взяться такое огромное число? Если бы у нас когда-нибудь появилась общая теория для двух этих явлений, то как она давала бы такую диспропорцию для двух электронов:

$$\frac{\text{сила тяготения}}{\text{электрическое отталкивание}} = \frac{1}{4{,}17 \cdot 10^{42}}.$$

Каким должно быть общее уравнение, если, решая его для двух видов сил — гравитационного притяжения и электрического отталкивания, мы приходим к такому фантастическому отношению?

Люди ищут этот огромный коэффициент в других явлениях природы. Они перебирают всякие большие числа, а если вам нужно большое число, почему не взять, скажем, отношение диаметра Вселенной к диаметру протона — как ни удивительно, это тоже число с 42 нулями. И вот говорят: может быть, этот коэффициент и равен отношению диаметра протона к диаметру Вселенной? Это интересная мысль, но, поскольку Вселенная постепенно расширяется, должна меняться и постоянная тяготения. Хотя эта гипотеза еще не опровергнута, у нас нет никаких свидетельств в ее пользу. Наоборот, некоторые данные говорят о том, что постоянная тяготения не менялась таким образом. Это громадное число по сей день остается загадкой.

Чтобы покончить с теорией тяготения, я должен упомянуть еще о двух фактах.

Первое. Эйнштейну пришлось видоизменить законы тяготения в соответствии с принципами относительности. Первый из этих принципов гласит, что расстояние $x$ нельзя преодолеть мгновенно, тогда как по теории Ньютона силы действуют мгновенно. Эйнштейну пришлось изменить законы Ньютона. Эти изменения, уточнения очень малы. Одно из них состоит вот в чем: поскольку свет имеет энергию, энергия эквивалентна массе, а все массы притягиваются,— свет тоже притягивается и, значит, проходя мимо Солнца, должен отклоняться. Так оно и происходит на самом деле. Сила тяготения тоже слегка изменена в теории Эйнштейна. Но этого очень незначительного изменения в законе тяготения как раз достаточно, чтобы объяснить некоторые кажущиеся неправильности в движении Меркурия.

Второе. Физические явления в микромире подчиняются иным законам, нежели явления в мире больших масштабов. Встает вопрос: как проявляется тяготение в мире малых масштабов? На него ответит квантовая теория гравитации. Но квантовой теории гравитации еще нет. Люди пока не очень преуспели в создании теории тяготения, полностью согласованной с квантовомеханическими принципами и с принципом неопределенности.

Вы скажете: «Вы все время говорили только о том, что происходит, но не объяснили, что такое тяготение. Откуда оно? Что оно собой представляет? Ведь не хотите же вы сказать, что планета смотрит на Солнце, видит, насколько оно удалено, подсчитывает обратный квадрат расстояния в соотвествии с этим законом?» Иными словами, я просто изложил математический закон, но не объяснил его механизма. Возможности этого мы обсудим в следующей лекции «Связь математики с физикой».

Заканчивая лекцию, я хочу отметить некоторые особенности закона тяготения, характерные и для других законов, о которых мы упоминали по ходу разговора.

1. Закон тяготения выражается математически, так же как и другие законы.

2. Он не точен; Эйнштейну пришлось видоизменить его, но мы знаем, что он и сейчас не совсем точен, ибо мы еще не связали его с квантовой теорией. То же относится и к другим нашим законам — они не точны. Где-то на краю их всегда лежит тайна, всегда есть, над чем поломать голову. Может быть, это — свойство природы, а может быть, и нет, но

это свойственно тем законам, которые известны нам сегодня. Может быть, все дело тут в неполноте нашего знания.

3. Но поразительнее всего то, что закон тяготения прост. Его легко сформулировать так, чтобы не оставалось никаких лазеек для двусмысленности и для иного толкования. Он прост и поэтому прекрасен. Он прост по форме. Я не говорю, что он действует просто — движение разных планет, их взаимное влияние могут быть очень запутанными, и определить, как движется каждая звезда в шаровом скоплении, не в наших силах. Закон действует сложно, но его коренная идея проста. Это и роднит все наши законы. Сами по себе они всегда оказываются простыми, хотя в природе действуют сложным образом.

4. И, наконец, закон тяготения универсален. Он простирается на огромные расстояния, и Ньютон, которого интересовала Солнечная система, вполне мог бы предсказать, что получится из опыта Кавендиша, ибо весы Кавендиша, два притягивающихся шара, это маленькая модель Солнечной системы. Если увеличить ее в десять миллионов миллионов раз, то мы получим Солнечную систему. Увеличим еще в десять миллионов миллионов раз — и вот вам галактики, которые притягиваются друг к другу по тому же самому закону. Вышивая свой узор, Природа пользуется лишь самыми длинными нитями, и всякий, даже самый маленький образчик его может открыть нам глаза на строение целого.

# СВЯЗЬ МАТЕМАТИКИ С ФИЗИКОЙ

Если задуматься о приложениях математики и физики, то совершенно очевидно, что математика будет полезна там, где мы имеем дело с большим числом объектов в сложной обстановке. В биологии, к примеру, действие вируса на бактерию не дает никакой пищи для математики. В микроскоп мы увидим, что проворный маленький вирус находит какое-то место в причудливой бактерии (все они имеют разную форму) и либо вводит в нее свою ДНК, либо не вводит. Но если мы будем экспериментировать с миллионами и миллионами бактерий и вирусов, то сможем очень многое узнать о поведении вирусов в среднем. Мы можем использовать математику для того, чтобы находить среднее, для того, чтобы выяснить, развиваются ли вирусы в бактериях, какие виды развиваются и в каком количестве; подобным образом мы можем изучать генетику, мутации и т. п.

Возьмем другой, более тривиальный пример. Представим себе огромную шахматную доску, на которой играют в шахматы или шашки. Каждый отдельный ход — операция не математическая или математически очень простая. Но нетрудно сообразить, что на доске с множеством фигур оценку наилучших ходов, ходов просто хороших или плохих можно сделать только после очень глубокого размышления, ибо каждый ход таит в себе огромное количество последствий. Тут необходимы абстрактные рассуждения и, следовательно, математика. Еще один пример — переключение в вычислительных машинах. Если у вас всего один переключатель, который может быть либо включен, либо выключен, то ничего особенно математического тут нет, хотя математики любят начинать именно с этого. Но чтобы предугадать поведение системы с множеством соединений и проводов, нужна математика.

Я хочу сказать с самого начала, что математика приносит огромную пользу физике там, где речь идет о деталях сложных явлений, если установлены основные правила игры. И если бы я говорил только о взаимоотношении математики и физики, то бóльшую часть времени отвел бы именно этому вопросу. Но поскольку лекции посвящены характеру физических законов, я не имею возможности подробно разбирать, что происходит в сложных ситуациях, и прямо перейду к своей теме — характеру основных законов.

Если снова обратиться к нашим шахматам, то основные законы здесь — это правила, по которым движутся фигуры. Математику можно использовать в сложной обстановке, чтобы сообразить, какие ходы в данных обстоятельствах наиболее выгодны. Но для того чтобы выразить простую суть основных законов, требуется очень мало математики. В шахматах это можно сделать на нашем обычном языке.

В физике же и для основных законов нам нужна математика. Я приведу два примера: в одном математика, по существу, не обязательна, а в другом необходима. Первый — закон физики, называемый законом Фарадея, который гласит, что при электролизе количество осажденного вещества пропорционально силе тока и времени его действия. Иначе говоря, количество осажденного вещества пропорционально заряду, проходящему через систему. Звучит это очень математически, но на самом деле все сводится к тому, что электроны, проходящие по проводам, несут только по одному заряду. В частности, можно предположить, что каждый электрон вызывает осаждение одного атома. Тогда число осажденных атомов равно числу прошедших электронов, т. е. пропорционально заряду, протекшему по проводу. Таким образом, этот закон, который кажется математическим, в основе своей прост и на самом деле не требует знания математики. Для осаждения одного атома нужен один электрон — это, конечно, математика, но не та математика, о которой мы здесь говорим.

Второй пример — это закон тяготения Ньютона, который мы рассматривали в предыдущей лекции. Я привел вам уравнение

$$F = G\frac{mm'}{r^2},$$

чтобы поразить вас тем, насколько быстро математические символы могут передавать информацию. Я говорил, что сила пропорциональна произведению масс двух тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, а так-

же что тела реагируют на силы, изменяя свою скорость в направлении действия силы на величину, пропорциональную силе и обратно пропорциональную своим массам. Как видите, все это слова, и было совсем не обязательно писать уравнение. Тем не менее здесь есть математика, и мы можем спросить себя, почему такой закон может быть основным законом. Что делает планета? Неужели она смотрит на Солнце, видит, насколько оно удалено, и вычисляет на своем арифмометре обратный квадрат расстояния, чтобы узнать, как нужно двигаться? Ясно, что это не объяснение механизма гравитации! Вам, может быть, захочется взглянуть поглубже, и многие пытались это сделать. Еще Ньютона спрашивали о его теории: «Но ведь она ничего не говорит, она ничего не объясняет?» Ньютон отвечал: «Она говорит, *как* движутся тела. Этого должно быть достаточно. Я сказал вам, как они движутся, а не почему». Но людей зачастую трудно удовлетворить, не объяснив им механизм, и я расскажу об одной из теорий, которые выдвигались в качестве объяснения гравитации. Согласно этой теории тяготение представляет собой результат многих отдельных воздействий, и этим объясняется, почему закон Ньютона связан с математикой.

Предположим, что мир повсюду полон частиц, пролетающих сквозь нас с очень большой скоростью. Они летят во всех направлениях — просто проносятся мимо, но некоторые из них попадают в нас. Мы и Солнце практически прозрачны для них, практически, но не полностью, и некоторые из них нас ударяют. Посмотрим, к чему это должно привести.

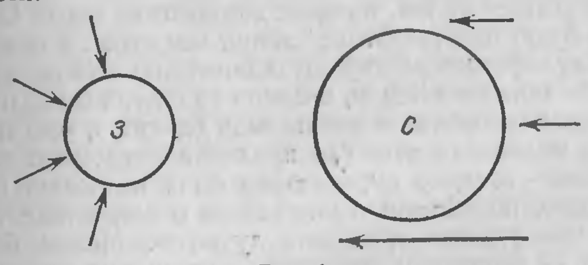



Рис. 12

На рис. 12 *С* — Солнце, *З* — Земля. Если бы Солнца не было, то частицы обстреливали бы Землю со всех сторон, барабанили по ней и каждая упавшая частица немного подталкивала бы Землю. Это не сдвинет Землю ни в каком определенном направлении, потому что с одного боку налетает

столько же частиц, сколько с другого, снизу столько же, сколько сверху. Однако если Солнце на месте, то оно в какой-то мере поглощает частицы, летящие с этой стороны, потому что некоторые из них, попадая в Солнце, не проходят его насквозь. Следовательно, со стороны Солнца к Земле прилетает меньше частиц, чем с других сторон, ибо они наталкиваются на препятствие — на Солнце. Нетрудно понять, что чем дальше Солнце, тем меньшую долю частиц, попадающих на Землю, оно будет задерживать. Солнце будет казаться меньше — как раз пропорционально квадрату расстояния. Поэтому со стороны Солнца на Землю будет действовать импульс, обратно пропорциональный квадрату расстояния. Он будет представлять собой результат большого количества простых операций — ударов, которые один за другим сыплются со всех сторон. Таким образом, в этом математическом соотношении нет ничего странного, ибо основная операция значительно проще, чем подсчет обратного квадрата расстояния. Подсчет производят сами частицы, ударяясь о Землю.

Единственный недостаток этой схемы — в том, что она не годится совсем по другим соображениям. Всякую придуманную теорию надо проанализировать в отношении *всех* ее возможных последствий, выяснить, не предсказывает ли она другие явления. А эта теория предсказывает другие явления. Если Земля движется, то спереди в нее будет ударяться больше частиц, чем сзади. (Когда вы бежите под дождем, в лицо вам попадает больше капель, чем на затылок, именно потому, что вы бежите.) Если Земля движется, то она налетает на те частицы, которые находятся перед ней, и убегает от тех, которые догоняют ее сзади. Спереди на нее будет падать больше частиц, чем сзади, и они создадут силу, противодействующую движению. Эта сила замедлила бы движение Земли, и Земля не смогла бы долго продержаться на орбите,— но она ведь держится, уже три или четыре миллиарда лет. Так приходит конец этой теории. «Что же,— скажете вы,— теория была неплохая, и хоть ненадолго, но позволила мне забыть о математике. Может быть, мне удастся придумать лучшую». Может быть, и удастся — окончательная истина никому еще не известна. Но со времени Ньютона и до наших дней никто не мог описать механизм, скрытый за законом тяготения, не повторив того, что уже сказал Ньютон, не усложнив математики или не предсказав явлений, которых на самом деле не существует. Так что до сих пор у нас нет иной модели для теории гравитации, кроме математической.

Если бы существовал только один закон такого характера, то это было бы интересным, хотя и досадным исключением. Но, оказывается, чем больше мы исследуем, чем больше законов мы открываем, чем глубже проникаем в природу, тем более хронической становится болезнь. Каждый новый наш закон — чисто математическое утверждение, притом довольно сложное и малопонятное. Ньютонова формулировка закона тяготения — это сравнительно простая математика. Но она становится все менее понятной и все более сложной по мере того, как мы продвигаемся вперед. Почему? Не имею ни малейшего понятия. Моя цель в том и состоит, чтобы лишь сообщить об этом факте. В нем и заключается смысл всей лекции: нельзя честно объяснить все красоты законов природы так, чтобы люди восприняли их одними чувствами, без глубокого понимания математики. Как ни прискорбно, но, по-видимому, это факт.

Вы, возможно, возразите: «Ладно, если нет объяснения законам, то по крайней мере скажите, в чем эти законы состоят. Почему вы не скажете этого словами вместо символов? Математика — просто язык, но ведь можно переводить с одного языка на другой». Да, можно, если иметь терпение, и, мне кажется, частично я это сделал. Я мог бы пойти немного дальше и объяснить смысл уравнения более подробно, например сказать, что при увеличении расстояния в два раза сила убывает вчетверо и т. д. Я мог бы передать все символы словами. Иначе говоря, я мог бы пойти навстречу любителям физики, которые сидят и с надеждой ждут от меня простого объяснения. Что касается умения объяснить эти сложные и запутанные предметы неспециалисту на доступном ему языке, то у разных людей — разные возможности. И вот неспециалист перебирает книгу за книгой в надежде обойти трудности, которые появляются рано или поздно даже в работах лучших популяризаторов. Но чем дальше он читает, тем больше путаницы: одно сложное утверждение за другим, одна малопонятная мысль за другой, и все, по-видимому, не связаны друг с другом. Смысл ускользает от него, но он надеется, что где-нибудь в другой книге есть объяснение...

Я в этом сомневаюсь, потому что математика — *не просто* другой язык. Математика — это язык плюс рассуждения, это как бы язык и логика вместе. Математика — орудие для размышления. В ней сконцентрированы результаты точного мышления многих людей. При помощи математики можно связать одно утверждение с другим. Например, я могу сказать, что сила направлена к Солнцу. Но я могу ска-

зать и по-другому (как в прошлой лекции): планета движется так, что если провести от Солнца к планете линию, затем другую линию, отделенную от первой определенным периодом, например тремя неделями, то площадь, которую опишет планета за эти три недели, равна площади, которую она опишет за следующие три недели, и за следующие три недели, и так далее по всей орбите. Я могу объяснить оба эти утверждения подробнее, но не могу объяснить, почему они означают одно и то же. Очевидные сложности природы с ее странными законами и правилами, каждое из которых можно объяснить очень подробно, на самом деле тесно связаны. Однако если вы не желаете пользоваться математикой, то в этом огромном многообразии фактов вы не увидите, что логика позволяет переходить от одного к другому.

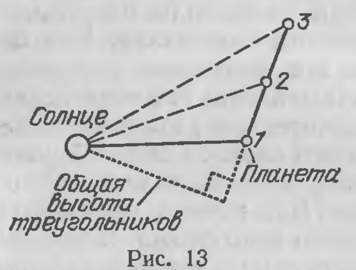



Рис. 13

Рис. 14

Как ни удивительно, но я могу доказать, что если силы направлены к Солнцу, то в равные промежутки времени описываются равные площади. Я попытаюсь доказать, что эти два закона эквивалентны, и тогда вам станут ясными не только формулировки этих двух утверждений. Вы убедитесь, что эти два закона связаны, что путем размышления можно перейти от одного к другому и что математика — это организованные рассуждения. Тогда вы оцените красоту взаимоотношений между этими двумя законами. Итак, докажем, что если сила направлена к Солнцу, то за равное время описываются равные площади.

Рассмотрим Солнце и планету (рис. 13) и вообразим себе, что в определенный момент времени планета находится в положении *1*. Она движется так, что через секунду, скажем, очутится в положении *2*. Если бы Солнце не действовало на планету, то, согласно галилееву принципу инерции, планета продолжала бы двигаться по прямой. Тогда по истечении такого же промежутка времени, следующей секунды, двигаясь по прямой линии и пройдя такое же расстояние, планета очутилась бы в положении *3*. Сначала мы докажем, что в равные промежутки времени описываются равные пло-

щади, если силы *нет*. Напомню, что площадь треугольника равна половине произведения основания на высоту, а высота — это расстояние по вертикали от вершины до основания треугольника. Если треугольник — тупоугольный (рис. 14), то высота — *AD*, а основание — *BC*. Теперь сравним площади, которые описывались бы при движении планеты, если бы Солнце на нее не действовало (рис. 13).

Вы помните, что два расстояния *1—2* и *2—3* равны. Вопрос в том, равны ли две площади. Рассмотрим треугольник, образованный Солнцем (*S*) и двумя точками *1* и *2*. Какова его площадь? Она равна основанию *1—2*, умноженному на половину перпендикуляра, опущенного на основание из точки *S*. Теперь — другой треугольник, образованный точками *2*, *3* и *S*. Его площадь равна основанию *2—3*, умноженному на половину перпендикуляра, опущенного из точки *S*. У этих двух треугольников одна и та же высота и, как я уже сказал, равные основания. Поэтому они имеют одинаковую площадь. Пока все идет прекрасно. Если бы со стороны Солнца не действовало никаких сил, то за равные промежутки времени описывались бы равные площади. Но Солнце действует на планету. На отрезке *1—2—3* Солнце притягивает планету, причем направление силы притяжения постепенно меняется. Чтобы получить хорошее приближение, возьмем среднее положение *2* и скажем, что весь эффект притяжения на отрезке *1—3* сводится к отклонению планеты на некоторое расстояние в направлении линии *2—S* (рис. 15).

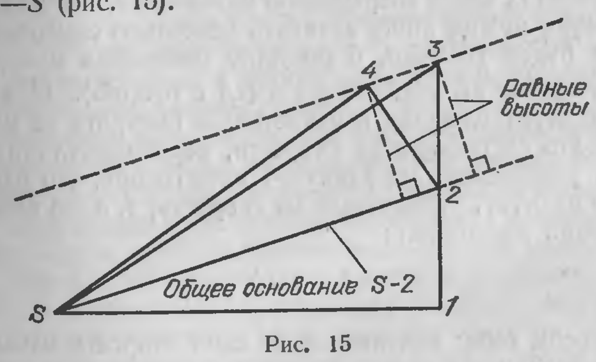



Рис. 15

Это означает, что тело двигалось по линии *1—2* и продолжало бы двигаться по ней, если бы не было силы, но притяжение Солнца заставляет тело двигаться по линии *2—S*. Таким образом, движение тела на следующем отрезке складывается из того, как планета двигалась бы самостоя-

тельно, и изменения, которое произошло под действием Солнца. Поэтому планета попадает не в положение *3*, а в положение *4*. Теперь мы сравним площади треугольников *23S* и *24S* и докажем, что они равны. У них общее основание *S—2*. Одинаковы ли у них высоты? Да, потому что треугольники заключены между параллельными линиями. Расстояние от точки *4* до линии *S—2* равно расстоянию от точки *3* до линии *S—2* (продолженной). Значит, площадь у треугольника *S24* такая же, как у *S23*. Раньше я доказал, что треугольники *S12* и *S23* равны по площади. Отсюда ясно, что *S12=S24*. Таким образом, при движении планеты по орбите площади, описываемые за первую и за вторую секунду, равны. Значит, путем рассуждений мы нашли связь между тем фактом, что сила направлена к Солнцу, и тем фактом, что площади равны. Не правда ли, остроумно? Я позаимствовал вывод прямо у Ньютона. Все это содержится в его «Principia»: и схема, и доказательство. Только цифры другие, потому что он пользовался римскими цифрами, а я — арабскими.

Все доказательства в книге Ньютона были геометрическими. Сегодня мы строим доказательства по-другому. Мы доказываем аналитически, при помощи символов. Чтобы построить нужные треугольники, подметить равенство площадей, требуется изобретательность. Теперь мы имеем усовершенствованные методы анализа, более быстрые и эффективные. Я хочу показать вам, как это выглядит в обозначениях более современной математики, где для доказательства нужно лишь записать несколько символов.

Мы будем говорить о быстроте изменения площади и обозначим эту величину через $\dot{A}$ («$A$ с точкой»). При повороте радиуса площадь изменяется, и быстрота ее изменения — это составляющая скорости, перпендикулярная радиусу, умноженная на радиус. Иначе говоря, это расстояние по радиусу, умноженное на скорость, т. е. на быстроту изменения расстояния:

$$\dot{A} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}.$$

Спросим себя: изменяется ли сама скорость изменения площади? Закон Кеплера говорит, что скорость изменения площади не должна меняться. Поэтому мы дифференцируем написанное равенство, а тут весь фокус в том, чтобы поставить точки в нужных местах — и ничего больше. Таким фокусам надо научиться: это просто набор правил, которые были придуманы, чтобы облегчить доказательства. Мы

пишем

$$\ddot{A} = \dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{r} \times \ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}/m.$$

Первое слагаемое — это составляющая скорости, перпендикулярная самой скорости. Оно равно нулю — скорость направлена вдоль самой себя. Ускорение $\ddot{\mathbf{r}}$ — это вторая производная $\mathbf{r}$, т. е. производная скорости. Она равна силе, деленной на массу.

Это означает, что скорость изменения скорости изменения площади есть составляющая силы, направленная под прямым углом к радиусу. Но если сила направлена по радиусу,

$$\mathbf{r} \times \mathbf{F}/m = 0,$$

как утверждал Ньютон, то под прямым углом к радиусу она не действует, а значит, скорость изменения площади не изменяется:

$$\ddot{A} = 0.$$

Мы видим, как много нам дает анализ при помощи символов. Ньютон более или менее умел это делать, только в несколько других обозначениях. Но он предпочел геометрические доказательства, стремясь к тому, чтобы люди могли прочесть его статьи. Он сам изобрел исчисление бесконечно малых, которым я воспользовался во втором доказательстве.

Это хорошая иллюстрация взаимоотношений между математикой и физикой. Когда в физике проблема оказывается трудной, мы можем заглянуть к математикам — вдруг они уже встречались с такими вопросами и имеют готовые способы доказательства? Но может оказаться, что они этим еще не занимались. Тогда нам придется самим изобрести доказательства и потом передать их математикам. Каждый, кто рассуждает о чем-нибудь точно, показывает тем самым, как человек мыслит, и если представить его рассуждения в общем виде и передать математикам, то они внесут его в свои книги в качестве раздела математики. Математика — это путь, по которому мы переходим от одной совокупности утверждений к другой. И она, очевидно, полезна в физике, потому что говорить о вещах мы можем по-разному, а математика позволяет нам выяснить следствия, анализировать ситуации и видоизменять законы, чтобы связать различные утверждения. В общем физик знает очень мало. Он только должен помнить правила, которые позволяют переходить от одного к другому, ибо все эти различные утверждения о

равенстве интервалов времени, о силе, направленной по радиусу, и т. д. тесно связаны логикой.

Тут возникает интересный вопрос. Существует ли какая-нибудь отправная точка для всех наших выводов? Существует ли в природе такой порядок, который позволял бы нам говорить, что одна совокупность утверждений — более фундаментальная, а другая представляет собой ее следствие? Возможны два взгляда на математику. Для удобства один из них я назову вавилонской традицией, а другой — греческой традицией. В вавилонских школах математики ученик решал огромное множество примеров, пока не улавливал общего правила. Он подробно знал геометрию, множество свойств круга, теорему Пифагора, формулы для площадей квадратов и треугольников; кроме того, существовали некоторые способы выводить одно из другого. Имелись числовые таблицы, при помощи которых можно было решать сложные уравнения. Все было подготовлено для того, чтобы производить вычисления. Но Евклид обнаружил, что все теоремы геометрии можно вывести из нескольких простых аксиом. Вавилонский подход — я назвал бы его вавилонской математикой — заключается в том, что вы знаете самые разные теоремы, многие связи между ними, но не осознаете до конца, что все они могут быть выведены из набора аксиом. Самая же современная математика делает упор на аксиому и доказательства, исходя из очень четких соглашений о том, что можно и что нельзя считать аксиомами. Современная геометрия берет аксиомы, подобные евклидовым, но несколько усовершенствованные, и выводит из них все остальное. Например, такие теоремы, как теорема Пифагора (сумма квадратов катетов прямоугольного треугольника равна квадрату гипотенузы), не будут аксиомами. Но возможно и другое построение геометрии — так, например, в геометрии Декарта теорема Пифагора является аксиомой.

Итак, прежде всего мы должны согласиться с тем, что даже в математике можно отправляться от разных исходных положений. Поскольку все теоремы связаны друг с другом логикой, нельзя сказать, что такие-то утверждения мы считаем основными аксиомами, ибо если вместо них вам предложат другие аксиомы, то и по ним вы сможете построить всю геометрию. Это подобно мосту, составленному из одинаковых секций. Если он развалится, вы можете восстановить его, соединив секции в другом порядке. Сегодняшняя математическая традиция состоит в том, что берут определенные идеи, которые условились считать аксио-

мами, и исходя из них строят все здание. Если же следовать вавилонской традиции, то мы скажем: «Я знаю то, я знаю это и как будто бы знаю вот это; отсюда я вывожу все остальное. Может быть, завтра я что-то забуду, но что-то я буду помнить и по этим остаткам смогут восстановить все заново. Я не очень хорошо знаю, с чего я должен начать и чем кончить. Но в голове у меня всегда достаточно сведений, так что если я забуду часть из них, то все равно смогу это восстановить».

Доказывая теоремы, невыгодно каждый раз начинать с аксиом. Вы не сильно преуспеете в геометрии, если станете доказывать всякое положение, каждый раз отправляясь от аксиом. Конечно, если вы располагаете определенными сведениями в геометрии, то всегда сможете вывести из них кое-что еще; но гораздо выгоднее поступать иначе. Дорога, которая начинается с выбора наилучших аксиом, не всегда кратчайшая дорога к цели. В физике нам нужен вывилонский метод, а не греческий. Постараюсь объяснить почему.

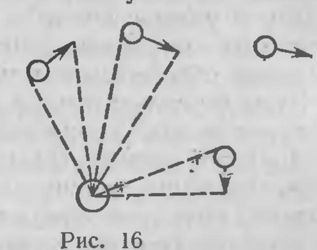


Рис. 16

При евклидовом подходе наша задача — подобрать как можно более интересные и важные аксиомы. Но относительно тяготения, например, мы могли бы спросить себя: какая аксиома лучше — о том, что сила направлена к центру, или о том, что за равные промежутки времени описываются равные площади? Если я буду исходить из того, каковы силы, то смогу рассматривать систему, состоящую из многих тел, орбиты которых уже не являются эллипсами, потому что силовая формулировка говорит мне о взаимном притяжении этих тел. В этом случае теорема о равенстве площадей несправедлива. Поэтому мне кажется, что аксиомой должен быть именно закон сил. С другой стороны, принцип равенства площадей можно сформулировать в виде более общей теоремы для многих тел. Она довольно сложна и совсем не так красива, как первоначальное утверждение о равенстве площадей, но, несомненно, является его порождением. Рассмотрим систему многих тел, взаимодействующих друг с другом, например Юпитер, Сатурн, Солнце, множество звезд, и, глядя на них издали, спроектируем свою систему на плоскость (рис. 16). Тела движутся в разных направлениях. Возьмем в качестве центра произвольную точку и подсчи-

таем, какую площадь описывают радиусы, проведенные из центра к каждому телу. При этом будем учитывать массу — если у одного тела масса вдвое больше, чем у другого, то соответствующую площадь будем умножать на два. Так мы подсчитаем все площади, описываемые радиусами, а затем сложим их пропорционально соответствующим массам. *Такая сумма площадей не будет изменяться со временем.* Она называется моментом количества движения системы, а закон — законом сохранения момента количества движения. «Сохранение» означает всего-навсего, что величина не изменяется.

Вот одно из следствий этого закона. Вообразим множество звезд, которые сближаются друг с другом, чтобы образовать туманность или галактику. Сначала они разбросаны очень далеко от центра. Звезды медленно движутся вокруг него, и радиусы описывают определенные площади. По мере их сближения расстояния до центра сокращаются, радиусы уменьшаются, и, чтобы описать прежнюю площадь, звезды вынуждены двигаться гораздо быстрее. Таким образом, сближаясь, звезды вращаются все быстрее и быстрее. Этим (приблизительно) и объясняется форма спиральных туманностей. То же самое происходит, когда фигурист крутится на льду. Он начинает, отставив ногу, и вращается медленно, а опуская ногу, крутится быстрее. Когда нога вытянута, она описывает за секунду определенную площадь. Опустив ее, фигурист должен вращаться гораздо быстрее, чтобы описать ту же самую площадь. Правда, я доказывал это не для людей — они пользуются мускульной силой, а не силой тяготения. Но закон справедлив и для спортсменов.

Тут мы приходим к интересной проблеме. Зачастую из частного закона физики, такого, как закон тяготения, можно вывести принцип гораздо более общий, чем само содержание частного закона. В математике этого не бывает; теоремы не появляются там, где их не ожидают. Поясним примером. Если в качестве постулата физики мы взяли бы закон равенства площадей для сил тяготения, то мы могли бы вывести закон сохранения момента импульса, но только для сил тяготения. А на опыте мы обнаруживаем, что закон сохранения момента распространяется на более широкий круг явлений. Ньютон принял другие постулаты, и ему удалось получить при их помощи более общий закон сохранения момента импульса. Пусть постулаты Ньютона неверны. Нет никаких сил — все это чепуха, частицы не имеют орбит и т. д. Тем не менее видоизмененный принцип ра-

венства площадей и закон сохранения момента справедливы. Они распространяются на движение атомов в квантовой механике и, насколько нам известно сегодня, вполне точны. Мы знаем эти общие принципы, которыми пронизаны самые разные законы. Но если мы будем слишком серьезно относиться к математическим доказательствам и считать, что одно справедливо только потому, что справедливо другое, то не сможем понять связи между различными отраслями физики. В тот день, когда физика станет полной и мы будем знать все ее законы, мы, вероятно, сможем начинать с аксиом, и, несомненно, кто-нибудь придумает, как их выбирать, чтобы из них получить все остальное. Но пока мы не знаем всех законов, по некоторым из них можно угадывать теоремы, которые еще не имеют доказательств. Чтобы понимать физику, необходимо строгое равновесие в мыслях. Мы должны держать в голове все разнообразные утверждения и помнить об их связях, потому что законы часто простираются дальше своих доказательств. Надобность в этом отпадет только тогда, когда будут известны все законы.

Во взаимоотношениях физики и математики имеется еще одна интересная черта: математика позволяет доказать, что в физике исходя из разных точек зрения можно прийти к одним и тем же выводам. Это и понятно: если у вас есть аксиомы, то вместо них вы можете воспользоваться некоторыми теоремами; физические же законы построены так деликатно, что их различные, хотя и эквивалентные формулировки качественно отличаются. Этим они и любопытны. Для примера я сформулирую закон тяготения тремя разными способами. Все они совершенно эквивалентны, но звучат очень несхоже.

Первая формулировка — это когда силы между телами описываются уравнением, которое я приводил выше:

$$F = G\frac{mm'}{r^2}.$$

Каждое тело, «узнав», что на него действует сила, ускоряется, т. е. изменяет свое движение на определенную величину за секунду. Это обычная формулировка закона, я назову ее ньютоновой. Эта формулировка говорит, что сила зависит от чего-то находящегося на конечном расстоянии. Она обладает так называемым свойством нелокальности. Сила, действующая на предмет, зависит от того, насколько удален от него другой предмет.

Вам, возможно, не понравится мысль о действии на расстоянии. Откуда может узнать предмет, что происходит

вдалеке? Ну что ж, имеется другой способ сформулировать закон — очень странный. Он основан на понятии поля. Объяснить его трудно, но я попытаюсь дать вам хотя бы приблизительное представление. Звучит он совсем по-другому. В каждой точке пространства имеется число (именно число, а не механизм: в том-то и вся беда с физикой, что она должна быть математической), и, когда вы переходите с места на место, это число меняется. Если в какой-то точке пространства поместить предмет, то на него будет действовать сила в том направлении, в котором быстрее всего изменяется это число (я дам ему обычное название — потенциал; сила действует в направлении быстрейшего изменения потенциала). Далее, сила пропорциональна тому, насколько быстро изменяется потенциал при перемещении из одной точки в другую. Это только одна часть формулировки, и ее недостаточно, потому что я еще не сказал вам, как именно изменяется потенциал. Я мог бы сказать, что потенциал изменяется обратно пропорционально расстоянию от каждого тела, но тогда мы снова вернулись бы к понятию о действии на расстоянии. Можно сформулировать закон подругому, сказав: нам не надо знать, что происходит за пределами маленького шарика. Если вы хотите знать, чему равен потенциал в центре, скажите мне просто, каков он на поверхности сколь угодно малого шарика. Вам не надо смотреть вокруг шарика, скажите лишь, каков потенциал по соседству с интересующей вас точкой и какова масса шарика. Правило таково. Потенциал в центре равен среднему потенциалу на поверхности шарика минус постоянная $G$, которая была в предыдущем уравнении, поделенная на удвоенный радиус шарика (обозначим его через $a$) и умноженная на массу шарика, если шарик достаточно мал:

$$\text{Потенциал в центре} = \text{Средний потенциал на сфере} - \frac{G}{2a} \times \text{Масса сферы}.$$

Как видите, этот закон отличается от предыдущего, ибо он говорит нам, что происходит в некоторой точке, если известно, что происходит рядом с ней. Ньютонова же формулировка позволяет сказать, что происходит в данный момент времени, если мы знаем, что происходит в предыдущий момент. Во времени она переводит нас плавно от момента к моменту, но в пространстве заставляет скакать из одного места в другое. Вторая формулировка локальна и во времени, и в пространстве, потому что она говорит о соседних

точках. Но в математическом смысле обе формулировки эквивалентны.

Существует еще и третья формулировка, основанная на качественно иных понятиях. Если вам не нравится действие на расстоянии, то я показал вам, как можно без него обойтись. Теперь я дам вам формулировку, которая в философском смысле прямо противоположна предыдущей. Тут нам не нужно переходить от момента к моменту, от точки к точке; мы опишем все сразу, целиком. Пусть у нас имеется несколько частиц и вы желаете знать, как одна из них перемещается из одного места в другое. Вообразим все возможные пути перехода из одного места в другое за данный отрезок времени (рис. 17). Скажем, частица должна перейти из точки $X$ в точку $Y$ за час и вы желаете знать, по какому пути она может двигаться. Вы воображаете всевозможные кривые и для каждой кривой подсчитываете определенную величину. (Я не хочу рассказывать, какая это величина, но для тех, кто о ней наслышан, напомню, что для каждого пути она равна среднему значению разности между кинетической и потенциальной энергией.) Если вы подсчитаете эту величину для одного пути, а затем для другого, то для разных путей получите разные числа. Но один из путей дает наименьшее возможное число — именно этим путем и воспользуется на самом деле частица! Теперь мы описываем действительное движение, эллипс, высказывая нечто о кривой в целом. Нам не нужно думать о причинности, о том, что частица чувствует притяжение и движется в согласии с ним. Вместо этого мы говорим, что она разом «обнюхивает» все кривые, все возможные пути и решает, какой выбрать. (Выбирает тот, для которого наша величина — минимальная.)

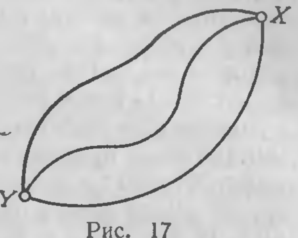


Рис. 17

Вот вам пример, сколько прекрасных способов существует для описания природы. Если нам говорят, что в Природе должна господствовать причинность, вы можете взять ньютонову формулировку; если настаивают, что Природа должна обладать свойствами локальности — к вашим услугам вторая формулировка; если же вас убедили, что Природу нужно описывать при помощи принципа минимума,— берите третью. Какая же из них правильна? Если они математически неравнозначны, если из них вытекают разные следствия, то нам остается лишь выяснить на эксперименте,

как именно поступает Природа. К нам могут подойти люди и завести философский спор, что одна им нравится больше, чем другая; но опыт научил нас, что в предсказании поступков Природы философские предчувствия не оправдываются. Мы просто должны представить себе все возможности и затем все их перепробовать. Но в том случае, с котором мы сейчас говорили, все теории совершенно эквивалентны. С точки зрения математической все эти три формулировки — ньютонова, локальная полевая и принцип минимума — приводят к совершенно одинаковым последствиям. Что же тогда делать? Вы прочтете в любой книге, что мы не имеем права отдать научное предпочтение одной из них. И это правда. В научном смысле они эквивалентны. Нет такого опыта, который позволил бы нам сделать этот выбор, потому что все следствия одинаковы. Но психологически они различны. Во-первых, они могут нравиться или не нравиться в философском плане; эту болезнь можно вылечить только тренировкой. Во-вторых, психологическое различие между ними становится особенно важным, когда вы отправляетесь на поиски новых законов.

Пока физика не полна и мы пытаемся открыть новые законы, различные возможные формулировки могут послужить путеводными нитями к пониманию того, что произойдет при других обстоятельствах. В этом случае они психологически не равноценны, ибо толкают нас на разные догадки относительно того, как может выглядеть закон в более общей ситуации. Например, Эйнштейн понял, что *электрические* сигналы не могут распространяться быстрее света. Он догадался, что это общий принцип. (Подобной игрой в догадки занимались и мы, когда брали закон сохранения момента количества движения и переносили его с одного частного случая, для которого он доказан, на все явления природы.) Эйнштейн догадался, что это общее свойство природы, и в том числе гравитации. Если сигналы не могут распространяться быстрее света, то формулировка, подразумевающая мгновенные взаимодействия, очень плоха. Поэтому в обобщенной теории гравитации, созданной Эйнштейном, метод Ньютона безнадежно слаб и чудовищно сложен, тогда как метод полей и принцип минимума точны и просты. Какой из двух предпочесть — мы до сих пор не решили.

На самом деле оказывается, что в квантовой механике ни один из них не точен в том виде, в каком я их сформулировал, а сам факт существования принципа минимума является следствием того, что в микромире частицы подчиня-

ются квантовой механике. Сейчас наилучшим законом нам представляется комбинация принципа минимума и локальных законов. Сегодня мы думаем, что законы физики должны иметь локальный характер и в то же время сочетаться с принципом минимума, но наверняка мы этого не знаем. Если в системе знаний таится какая-то погрешность, но построена система на удачиых аксиомах, то впоследствии вы обнаружите, что неверна лишь одна из них, а остальные справедливы; в этом случае потребуются лишь незначительные переделки. Но если вы строили систему на других аксиомах, то она может вся развалиться из-за того, что целиком опирается на одну-единственную слабую деталь. Мы не можем сказать заранее, не прибегая к интуиции, как лучше всего строить систему, чтобы прийти к новому закону. Мы постоянно должны иметь в виду все возможные способы описания; поэтому физики занимаются вавилонской математикой и уделяют мало внимания аксиоматическому построению своей науки.

Одна из поразительных особенностей природы — многообразие возможных схем ее истолкования. Это обусловлено самим характером наших законов, тонких и четких. Например, свойство локальности существует только потому, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния. Если бы там стоял куб, мы не имели бы локального метода. С другой стороны, тот факт, что сила связана с быстротой изменения скорости, позволяет записывать законы, пользуясь принципом минимума. Если бы сила, например, была пропорциональна самой скорости перемещения, а не ускорению, то это было бы невозможно. Стоит сильно изменить законы, и вы обнаружите, что число возможных формулировок сократилось. Мне это всегда представлялось загадкой. Я не понимаю, почему правильные законы физики допускают такое огромное количество разных формулировок. Они похожи на крокетный шар, который проходит сразу через несколько ворот.

Наконец, я хотел бы сделать несколько более общих замечаний о связи математики с физикой. Математики имеют дело только со структурой рассуждений, и им, в сущности, безразлично, о чем они говорят. Им даже не нужно знать, о чем они говорят, или, как они сами выражаются,— истинны ли их утверждения. Объясню почему. Вы формулируете аксиомы: «То-то и то-то обстоит так, а то-то и то-то обстоит так». Что дальше? Дальше можно заниматься логикой, не зная, что означают слова «то-то и то-то». Если аксиомы полны и сформулированы точно, то человеку, строя-

щему доказательство, необязательно понимать значение слов, для того чтобы получить новый вывод на языке, которым он пользуется. Если в одной из аксиом стоит слово «треугольник», то в выводах математика будут какие-то утверждения относительно треугольников, однако при получении этих выводов он не обязан знать, что за вещь — треугольник. Я же могу вернуться к началу его рассуждений и сказать: «Треугольник — это фигура с тремя сторонами, которая представляет собой то-то и то-то». И тогда я пойму его новые выводы. Другими словами, математик готовит абстрактные доказательства, которыми вы можете воспользоваться, приписав реальному миру некоторый набор аксиом. Физик же не должен забывать о значении своих фраз. Это очень важная обязанность, которой склонны пренебрегать люди, пришедшие в физику из математики. Физика — не математика, а математика — не физика. Одна помогает другой. Но в физике вы должны понимать связь слов с реальным миром. Получив какие-то выводы, вы должны их перевести на родной язык и на язык природы — в медные кубики и стеклянные шарики, с которыми вы будете экспериментировать. Только так вы сможете проверить истинность своих выводов. В математике этой проблемы не существует вовсе.

Вполне понятно, что доказательства и способы мышления, найденные математиками, становятся для физиков могучими и полезными орудиями. Но и рассуждения физиков часто приносят пользу математикам.

Математики любят придавать своим рассуждениям возможно более общую форму. Если я скажу им: «Я хочу поговорить об обычном трехмерном пространстве»,— они ответят: «Вот вам все теоремы о пространстве $n$ измерений».— «Но у меня только три измерения».— «Хорошо, подставьте $n=3$!» Оказывается, что многие сложные теоремы выглядят гораздо проще, если их применить к частному случаю. А физика интересуют только частные случаи; он никогда не интересуется общим случаем. Он говорит о чем-то конкретном; ему не безразлично, о чем говорить. Он хочет обсуждать закон тяготения в трехмерном пространстве; ему не нужны произвольные силы в пространстве $n$ измерений. Он стремится к сокращениям, потому что математики готовят свои выводы для более широкого круга проблем. И поступают предусмотрительно, ибо в конце концов бедный физик всегда вынужден возвращаться и говорить: «Простите, но в прошлый раз вы хотели мне что-то сказать о четырех измерениях».

Когда вы знаете, о чем идет речь, знаете, что одни символы означают силы, другие — массы, инерцию и т. д., вы можете обратиться за помощью к здравому смыслу, к интуиции. Вы видели разные вещи и более или менее знаете, как будут происходить разные явления. Несчастный математик переводит все это на язык уравнений, и, поскольку символы для него ничего не означают, у него лишь один компас — математическая строгость и тщательность в доказательствах. Физик же, который более или менее знает, каким должен быть ответ, может позволить себе догадки и приходит к цели довольно быстро. Излишняя математическая строгость не очень полезна в физике. Но нельзя ставить это в вину математикам. Нельзя требовать, чтобы они действовали всегда с оглядкой на физику и делали то, что полезно ей. У них свои задачи. Если вы хотите чего-то иного, займитесь этим сами.

Следующий вопрос: когда мы пытаемся найти новые законы, стоит ли опираться на интуицию и философские принципы — «мне не нравятся локальные свойства» или «мне нравятся локальные свойства», «мне не нравится воздействие на расстоянии» или «мне нравится воздействие на расстоянии»? В какой степени полезны модели? Интересно, что модели очень часто помогают в работе, и большинство преподавателей физики пытаются учить тому, как пользоваться моделями, чтобы выработать хорошую физическую интуицию. Но всегда выходит так, что величайшие открытия абстрагируются от модели и модель оказывается ненужной. Максвелл создал электродинамику, наполнив пространство массой воображаемых шестеренок и зубчатых колесиков. Но колесики и шестеренки мы отбросили, а теория осталась. Дирак *) же открыл правильные законы релятивистской квантовой механики, просто угадав уравнение. Угадывание уравнения, по-видимому, очень хороший способ открывать новые законы. Это лишний раз доказывает, что математика дает глубокое описание природы, а всякая попытка выразить природу, опираясь на философские принципы или интуитивные механические аналогии, не приводит к серьезным результатам.

Меня всегда беспокоило, что, согласно физическим законам, как мы понимаем их сегодня, требуется бесконечное число логических операций в вычислительной машине, чтобы определить, какие процессы происходят в сколь угодно

*) Поль Дирак (1902—1984) — английский физик-теоретик. Получил Нобелевскую премию в 1933 г. совместно с Шредингером.

малой области пространства за сколь угодно малый промежуток времени. Как может все это уложиться в крохотном пространстве? Почему необходима бесконечная работа логики для понимания того, что произойдет на крохотном участке пространства-времени? Поэтому я часто высказывал предположение, что в конце концов физика не будет требовать математической формулировки. Ее механизм раскроется перед нами, и законы станут простыми, как шахматная доска, при всей ее видимой сложности. Но это предположение того же порядка, что и склонности других людей — «это мне нравится», «это мне не нравится»,— а тут нельзя основываться на личных предубеждениях.

Подводя итоги, я хочу воспользоваться словами Джинса, который сказал, что «Великий Архитектор, по-видимому, был математиком». Тем, кто не знает математики, трудно постичь подлинную глубокую, красоту природы. Сноу *) говорил о двух культурах. Я думаю, что разница между этими культурами сводится к разнице между людьми, которые понимают, и людьми, которые не понимают математики в той мере, в какой это необходимо, чтобы вполне оценить природу.

Жаль, конечно, что тут нужна математика, потому что многим людям она дается трудно. Говорят — не знаю, правда ли это — что один царь, которого Евклид пытался обучить геометрии, стал жаловаться на трудности. Евклид ответил: «Нет царского пути к геометрии». И его действительно нет. Физику нельзя перевести ни на какой другой язык. И если вы хотите узнать Природу, оценить ее красоту, то нужно понимать язык, на котором она разговаривает. Она дает информацию лишь в одной форме, и мы не вправе требовать от нее, чтобы она изменила свой язык, стараясь привлечь наше внимание.

Никакими интеллектуальными доводами вы не сможете передать глухому ощущение музыки. Точно так же никакими интеллектуальными доводами нельзя передать понимание природы человеку «другой культуры». Философы пытаются рассказать о природе без математики. Я пытаюсь описать природу математически. Но если меня не понимают, то не потому, что это невозможно. Может быть, моя неудача объясняется тем, что кругозор этих людей чересчур ограничен и они считают человека центром Вселенной.

---

*) Чарлз Сноу — английский писатель. В лекции «Две культуры и научная революция», прочитанной в Кембридже в 1959 г., он говорил о разрыве между наукой и гуманитарной культурой.— *Примеч. пер.*

ЛЕКЦИЯ 3

## ВЕЛИКИЕ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Изучая физику, вы обнаруживаете, что существует огромное количество сложных и очень точных законов — законы гравитации, электричества и магнетизма, законы ядерных взаимодействий и т. д. Но все это многообразие отдельных законов пронизано некими общими принципами, которые так или иначе содержатся в каждом законе. Примерами таких принципов могут служить законы сохранения, некоторые свойства симметрии, общая форма квантовомеханических принципов и тот приятный для одних и досадный для других факт, что все законы являются математическими. В этой лекции я хочу поговорить о законах сохранения.

Физик употребляет обычные слова необычным образом. Для него закон сохранения означает, что существует число, которое остается постоянным вне зависимости от того, когда вы его подсчитаете — скажем, сейчас или через некоторое время, после того как в природе произойдет множество изменений. Вот, например, закон сохранения энергии. Имеется величина, которую вы можете вычислять по определенным правилам, и ответ у вас всегда будет одинаковым, что бы ни случилось.

Понятно, что такие принципы могут оказаться полезными. Предположим, что физика, или, вернее, природа,— это огромная шахматная доска с миллионами фигур и мы пытаемся выяснить законы движения фигур. Великие боги, сидящие за доской, играют очень быстро, и нам трудно уследить за их ходами. Все же мы улавливаем некоторые правила — те правила, для выяснения которых не обязательно следить за каждым ходом. Например, предположим, что на доске стоит только один слон, белопольный. Он движется только по диагонали и поэтому всегда остается на белых квадратах. Если мы отвернемся, а затем посмотрим снова на доску, за которой играют боги, то белопольный слон будет по-прежнему стоять на доске, может быть в другом месте, но все равно на белом квадрате. Такова природа законов сох-

ранения. Мы можем узнать кое-что об игре, не вдаваясь в доскональное ее изучение.

Правда, в шахматах этот закон может оказаться не таким уж полезным. Если мы отвернулись надолго, то может случиться, что за это время слона успели съесть, пешка прошла в ферзи и бог решил, что выгоднее иметь слона вместо ферзя, а слон этот оказывается чернопольным. К сожалению, может выясниться, что некоторые из наших сегодняшних законов физики также несовершенны, но я опишу их вам такими, какими мы видим их в настоящее время.

Я сказал, что мы употребляем обычные слова в качестве научных терминов, а в заглавии этой лекции стоит слово «великий» — «Великие законы сохранения». Это не термин: я вставил его лишь затем, чтобы придать заглавию более патетическое звучание, и вполне мог бы назвать лекцию просто «Законы сохранения». Есть несколько законов сохранения, которые верны лишь приблизительно, но иногда оказываются полезными, их мы могли бы назвать «малыми» законами сохранения. Позже я расскажу об одном или двух из них. Но основные законы, которым посвящена эта лекция, насколько нам известно сегодня, совершенно точны.

Проще всего понять закон сохранения электрического заряда; с него я и начну. Существует число, полный электрический заряд мира, которое остается постоянным, что бы ни произошло. Если вы теряете заряд в одном месте, то находите его в другом. Сохранение относится только к полному электрическому заряду. Это опытным путем установил Фарадей *). Он экспериментировал с огромным металлическим шаром, к наружной поверхности которого был присоединен очень чувствительный гальванометр, чтобы следить за зарядом на поверхности; гальванометр был такой, что даже небольшой заряд давал сильные отклонения. Внутри шара Фарадей собрал разнообразное электрическое оборудование. Он создавал заряды, натирая стеклянные палочки кошачьим мехом, и строил большие электростатические машины, так что внутренность шара походила на лабораторию из фильма ужасов. Но в ходе всех его экспериментов на поверхности не появлялось никакого заряда; создать заряд было невозможно. Хотя стеклянная палочка заряжалась положительно, когда ее терли кошачьим мехом, мех получал точно такое же количество отрицательного заряда, и суммарный заряд всегда был равен нулю. Если бы внутри шара заряд создавался, то гальванометр, присоеди-

*) Майкл Фарадей (1791—1867) — английский физик.

ненный снаружи, показал бы это. Итак, полный заряд сохраняется.

Это нетрудно объяснить на очень простой модели, совсем не математической. Предположим, что мир состоит из частиц двух видов, электронов и протонов,— было время, когда он действительно представлялся людям настолько простым,— и предположим, что электроны несут отрицательный заряд, а протоны — положительный, так что мы можем их разделить. Мы можем взять кусок материала и отнять у него часть электронов или, наоборот, добавить. Но если считать, что сами электроны неизменны, не исчезают и не распадаются (это очень простое предположение, не имеющее отношения к математике), то разность между общим числом протонов и общим числом электронов меняться не будет. Больше того, в нашей простой модели не будет меняться ни одно из этих двух чисел. Но вернемся к зарядам. Вклад протонов положителен, а электронов — отрицателен, и если эти частицы не создаются и не уничтожаются поодиночке, то полный заряд будет сохраняться. В табл. 1 я перечислил некоторые сохраняющиеся величины; первая из них — заряд. Против вопроса, сохраняется ли заряд, я пишу «да».

Такая теоретическая модель очень проста, но со временем было обнаружено, что электроны и протоны нельзя считать постоянными и неизменными. Например, частица, называемая нейтроном, может распадаться на протон и электрон плюс что-то еще, о чем мы поговорим позже. Правда, оказывается, что нейтрон электрически нейтрален. Поэтому, хотя протоны и электроны не неизменны в том смысле, что их можно создать из нейтрона, заряд все равно сохраняется. При распаде нейтрона мы начинаем с нулевого заряда и получаем один заряд положительный и один отрицательный, что в сумме дает нуль.

Таблица 1

| | Заряд | Барионное число | Странность | Энергия | Момент количества движения |
|---|---|---|---|---|---|
| Сохраняется (локально) | Да | Да | Не всегда | Да | Да |
| Меняется порциями | Да | Да | Да | Нет | Да |
| Источник поля | Да | ? | ? | Да | |

Подобным же примером может служить другая частица, заряженная положительно, но отличная от протона. Она называется позитроном и представляет собой как бы зеркальное изображение электрона. Она во всех отношениях подобна электрону, за исключением того, что несет заряд противоположного знака и, что еще важнее, является античастицей, ибо, встретившись, электрон и позитрон взаимно уничтожаются и превращаются в свет. Так что сами по себе электроны не вечны. Электрон плюс позитрон дают свет. Этот свет, невидимый глазу, гамма-излучение; но видимый свет и гамма-излучение для физика — одно и то же, у них лишь разная длина волн. Таким образом, частица и соответствующая ей античастица могут взаимно уничтожаться, аннигилировать. Свет не имеет электрического заряда, но тут уничтожается один положительный и один отрицательный заряд, и суммарный заряд остается прежним. Таким образом, теория сохранения заряда немного усложняется, но по-прежнему имеет мало отношения к математике. Вы просто складываете число протонов с числом позитронов и отнимаете число электронов, а кроме того, учитываете другие частицы, например отрицательные антипротоны и положительные $\pi^+$-мезоны, ибо каждая элементарная частица несет заряд (возможно, равный нулю). Нам надо лишь сложить все заряды и найти общий, и, что бы ни случилось потом, какая бы реакция ни произошла, он будет оставаться постоянным.

Это одна сторона закона сохранения заряда. Теперь возникает интересный вопрос. Достаточно ли сказать, что заряд просто сохраняется, или надо еще что-нибудь добавить? Если бы заряд представлял собой вещественную подвижную частицу и сохранялся благодаря этому, то сохранение было бы гораздо более конкретным свойством. Мыслимы два возможных способа сохранения заряда внутри ящика. Первый способ — заряд перемещается внутри ящика из одного места в другое. Другая возможность состоит в том, что заряд в одном месте исчезает и в то же самое мгновение возникает в другом месте; это происходит одновременно, и общий заряд по-прежнему остается постоянным. Вторая возможность сохранения отличается от первой, когда для исчезновения заряда в одном месте и появления его в другом что-то должно перемещаться в промежуточном пространстве. Первая форма сохранения называется локальным сохранением зарядов и несет в себе гораздо больше смысла, чем простое утверждение о неизменности полного заряда. Как видите, мы уточняем наш закон — если действительно

заряд сохраняется локально. А это действительно так. Время от времени я пытался продемонстрировать вам возможности логики, позволяющей связывать одну идею с другой, и теперь хочу проследить с вами за рассуждениями Эйнштейна, который пришел к выводу, что если некоторая величина сохраняется (в данном случае речь пойдет о заряде), то она сохраняется локально. Это рассуждение основывается на следующем: если два человека пролетают друг мимо друга в космических кораблях, то вопрос о том, кто из них движется, а кто стоит на месте, нельзя решить путем эксперимента. Это так называемый принцип относительности; он гласит, что равномерное движение по прямой линии относительно. Для обоих наблюдателей любое физическое явление будет выглядеть одинаково и не скажет им, кто из них стоит и кто движется.

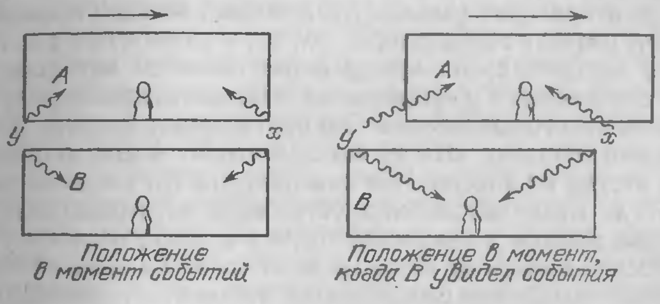



Рис. 18

Пусть у нас есть два космических корабля, *A* и *B* (рис. 18). Предположим, я придерживаюсь того мнения, что корабль *B* стоит, а корабль *A* движется мимо него. Запомните, что это только мое мнение. Вы можете стать на другую точку зрения, хотя и видите те же самые явления природы. Предположим теперь, что внутри корабля находится человек, который хочет выяснить, одновременно ли происходит исчезновение заряда в одном конце корабля и возникновение его в другом. Чтобы быть уверенным в одновременности этих событий, он не должен сидеть в носу корабля, иначе он увидит одно раньше другого, так как свет с кормы дойдет до него не сразу. Поэтому будем считать, что он поместился точно посредине корабля. Другой человек занимается такими же наблюдениями в своем корабле. Ударяет молния; в точке *x* создается заряд, и в тот же самый миг в другом конце корабля, в точке *y*, заряд уничтожается, исчезает. Заметьте, что это происходит одновре-

менно, в полном соответствии с нашими представлениями о сохранении заряда. Если мы теряем электрон в одном месте, то находим электрон в другом, но из первого места во второе ничто не перемещается. Предположим, что исчезновение и возникновение зарядов сопровождается вспышками, которые служат нам сигналом. Человек *B* говорит, что оба события произошли одновременно, потому что он сидит посредине корабля, а свет от вспышки в *x*, где заряд создается, и от вспышки в *y*, где заряд уничтожается, приходит к нему одновременно. Человек *B* скажет: «Да, оба события произошли одновременно». Но как посмотрит на это человек с другого корабля? Он скажет: «Нет, друг мой, вы ошибаетесь. Я видел, что в *x* заряд возник раньше, чем исчез в *y*». А все это потому, что он движется в направлении *x* и свет от *x* до наблюдателя проделывает меньший путь, чем от *y*, и приходит раньше. Этот человек может утверждать: «Нет, сначала заряд возник в *x*, а уж затем исчез в *y*. Значит, какое-то время между возникновением заряда в *x* и исчезновением в *y* существовал дополнительный заряд. Тут нет никакого сохранения. Это противоречит закону». Тогда первый возразит: «Но вы же движетесь». А второй ответит: «А откуда вы знаете? Мне кажется, что это вы движетесь», и т. д. Если невозможно установить экспериментальным путем, движемся мы или находимся в покое, поскольку физические законы от этого не зависят, то из нелокальности закона сохранения следовало бы, что он будет казаться правильным только тем людям, которые стоят на месте в абсолютном смысле. Но, согласно принципу относительности Эйнштейна, такое состояние невозможно, а следовательно, закон сохранения заряда не может быть нелокальным. Локальность сохранения заряда созвучна теории относительности, и то же самое можно сказать обо всех остальных законах сохранения. Как выяснилось, этот принцип распространяется на все сохраняющиеся величины.

Заряд обладает еще одним очень интересным и удивительным свойством, которому до сих пор не найдено объяснения. Оно никак не связано с законом сохранения. Заряд всегда изменяется порциями. Если у нас есть заряженная частица, то заряд ее может быть равен единице или двум, минус единице или минус двум. Хотя это свойство не связано с сохранением, я должен записать в табл. 1, что заряд изменяется порциями. Очень удобно, что он изменяется порциями — благодаря этому нам легче усвоить теорию сохранения. Речь идет о *вещах*, которые можно пересчитать и которые перемещаются из одного места в другое. И, нако-

нец, еще одно важное свойство заряда: он является источником электрического и магнитного поля. Поэтому на практике несложно определить величину полного заряда электрическим путем. Заряд — это мера взаимодействия тела с электричеством, с электрическим полем. Поэтому мы должны внести в табл. 1 еще одно свойство заряда: он является источником поля; другими словами, электричество связано с зарядом. Таким образом, эта сохраняющаяся величина обладает двумя свойствами, не связанными непосредственно с сохранением, но тем не менее интересными. Первое: заряд изменяется порциями — и второе: он является источником поля.

Существует много законов сохранения, и мы рассмотрим еще несколько законов, подобных сохранению заряда в том смысле, что они сводятся к простому пересчету. Например, существует закон сохранения барионов. Нейтрон может превратиться в протон. Если каждый из них мы будем считать единицей, или барионом, то число барионов при этом не изменится. Нейтрон несет единичный барионный заряд, т. е. представляет собой один барион; протон — тоже один барион (мы только и делаем, что считаем да придумываем умные слова!), поэтому если происходит реакция, о которой я сейчас говорил, и нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино, то полное число барионов не меняется. Но это не единственная реакция такого рода. Протон, взаимодействуя с другим протоном, может создавать множество странных вещей, например $\Lambda$-частицу, протон и $K^+$-мезон ($\Lambda$ и $K^+$ — названия странных частиц):

$$(\text{легко})\quad p+p\rightarrow\Lambda+p+K^+.$$

В этой реакции участвуют два бариона, но получается как будто бы только один — поэтому либо $\Lambda$-частица, либо $K^+$-мезон является барионом. Если мы проследим за поведением $\Lambda$-частицы, то обнаружим, что она очень медленно распадается на протон и $\pi$-мезон:

$$(\text{медленно})\quad \Lambda\rightarrow p+\pi,$$

а $\pi$-мезон в конце концов распадается на электроны и еще кое-что. Здесь снова появляется барион — в протоне, поэтому мы считаем, что барионный заряд $\Lambda$-частицы равен единице, а $K^+$-мезон не несет барионного заряда, его барионный заряд равен нулю.

Таким образом, в табл. 1 вдобавок к заряду появляется новая величина — барионный заряд, который мы подсчи-

тываем по такому правилу: барионное число равно числу протонов плюс число нейтронов плюс число Λ-частиц минус число антипротонов минус число антинейтронов и т. д. Это просто правило счета. Величина сохраняется, изменяется порциями, и хотя никто не уверен, но каждому хочется думать по аналогии, что она является источником поля. Мы для того и составляем такие таблицы, чтобы попытаться угадать законы ядерных взаимодействий, и это один из быстрейших способов разгадать природу. Если заряд является источником поля, а барионный заряд во всех остальных отношениях ведет себя точно так же, то он тоже должен быть источником поля. К сожалению, опыт пока что не подтверждает нашей догадки; может быть, она и верна, но мы слишком мало знаем, чтобы утверждать это с полной уверенностью.

Можно назвать еще одно или два таких правила счета, например для лептонного заряда, но основная идея их та же, что и в случае барионов. Есть, правда, один закон, несколько отличающийся от других. Реакции странных частиц характеризуются скоростью их протекания: одни реакции происходят легко и быстро, другие — медленно и с трудом. Слова «легко» и «с трудом» я употребляю не в смысле практического осуществления экспериментов. Речь идет о том, насколько быстро протекают реакции в естественной обстановке. Имеется явственное различие между двумя типами реакций, которые я упомянул; взаимодействием пары протонов и гораздо более медленным распадом Λ-частицы. Оказывается, что если рассматривать только быстрые и легкие реакции, то существует еще одно правило счета, согласно которому Λ-частице соответствует минус единица, $K^+$-мезону — плюс единица, а протону — нуль. Это число называется странностью или гиперонным зарядом. Оно сохраняется при всех быстрых реакциях, но не сохраняется при медленных. Поэтому в табл. 1 мы должны внести еще один закон сохранения, называемый законом сохранения странности или гиперонного заряда,— закон, справедливый только отчасти. Это очень странное свойство, и вполне понятно, почему сама величина названа странностью. Она сохраняется лишь в некоторых случаях, зато изменяется всегда порциями. При изучении сильных взаимодействий, с которыми связаны ядерные силы, физики обнаружили, что странность сохраняется. Это натолкнуло их на мысль, что при сильных взаимодействиях странность также является источником поля. Но опять-таки полной уверенности в этом нет. А рассказал я об этом для того,

чтобы стало яснее, как законы сохранения помогают нам угадывать новые законы.

Время от времени выдвигались другие законы сохранения, той же природы, что и эти правила счета. Химики, например, когда-то думали, что при любой реакции число атомов натрия остается неизменным. Но атомы натрия не неизменны. Можно превратить атомы одного элемента в атомы другого, так что первый элемент полностью исчезнет. Когда-то считался справедливым и другой закон: что постоянна полная масса предмета. Это зависит от того, как вы определяете массу и принимаете ли вы во внимание энергию. Закон сохранения массы содержится в законе сохранения энергии, который мы сейчас разберем. Из всех законов сохранения этот закон самый трудный и абстрактный, но и самый полезный. Его труднее понять, чем те, о которых мы только что говорили, потому что в случае заряда и в других рассмотренных случаях механизм понятен — все сводится более или менее к сохранению каких-то предметов. Более или менее потому, что одни предметы превращаются в другие, но все же речь идет о простом пересчете.

Сохранение энергии — несколько более сложный вопрос: хотя и здесь у нас есть число, которое не меняется со временем, число это не соответствует никакому определенному предмету. Чтобы прояснить суть дела, я приведу вам следующее простенькое сравнение.

Вообразите, что мать оставляет в комнате ребенка с 28 кубиками, которые нельзя сломать. Ребенок играет с кубиками целый день, и мать, вернувшись, обнаруживает, что кубиков по-прежнему 28 — она следит за сохранением кубиков! Так продолжается день за днем, но однажды, вернувшись, она находит всего 27 кубиков. Оказывается, один кубик валяется за окном — ребенок его выкинул. Рассматривая законы сохранения, прежде всего нужно убедиться в том, что ваши предметы не вылетают за окно. Такая же неувязка получится, если в гости к ребенку придет другой мальчик со своими кубиками. Ясно, что все это нужно учитывать, рассуждая о законах сохранения. В один прекрасный день мать, пересчитывая, обнаруживает всего 25 кубиков и подозревает, что остальные 3 ребенок спрятал в коробку для игрушек. Тогда она говорит: «Я открою коробку». «Нет,— отвечает он,— не смей открывать мою коробку». Но мама очень сообразительна и рассуждает так: «Я знаю, что пустая коробка весит 50 г, а каждый кубит весит 100 г, поэтому мне надо просто-напросто взве-

сить коробку». Затем, подсчитав число кубиков, она получит

$$\text{Число видимых кубиков} + \frac{\text{Масса коробки} - 50\ \text{г}}{100\ \text{г}}$$

— опять 28. Какое-то время все идет гладко, но потом сумма опять не сходится. Тут она замечает, что в раковине изменился уровень грязной воды. Она знает, что если кубиков в воде нет, то глубина ее равна 15 см, а если положить туда один кубик, то уровень повысится на 0,5 см. Поэтому она добавляет еще одно слагаемое:

$$\text{Число видимых кубиков} + \frac{\text{Масса коробки} - 50\ \text{г}}{100\ \text{г}} + \frac{\text{Уровень воды} - 15\ \text{см}}{0{,}5\ \text{см}}$$

и снова получается 28. Ребенок становится все более изобретательным, а мать не уступает ему, добавляя все новые и новые слагаемые, которые соответствуют кубикам, но с математической точки зрения представляют собой абстрактные числа, потому что самих кубиков не видно.

Теперь я попытаюсь объяснить, в чем сходство между сохранением кубиков и сохранением энергии и в чем различие. Для начала предположим, что ни при каких условиях вы не можете видеть кубики. Слагаемое «число видимых кубиков» всегда отсутствует. Тогда мать будет складывать множество слагаемых, таких, как «кубики в коробке», «кубики в воде» и т. д. Кубиков энергии, насколько нам известно, вообще нет. Кроме того, в отличие от кубиков количество энергии не обязательно выражается целым числом. Бедная мамаша может получить в одном слагаемом $6^1/_8$ кубика, в другом — $^7/_8$, в третьем — 21 кубик, что по-прежнему составляет в сумме 28. Так обстоит дело с энергией.

Мы установили, что для закона сохранения энергии у нас есть схема с целым набором правил. Согласно каждому из этих правил, мы можем вычислить значение для каждого из видов энергии. Если мы сложим все значения, соответствующие разным видам энергии, то сумма их всегда будет одинаковой. Но, насколько мы знаем, не существует никаких реальных частиц (кубиков или шариков) энергии. Это абстрактное, чисто математическое правило: существует число, которое не меняется, когда бы вы его ни подсчитали. Более вразумительного объяснения я дать вам не в силах.

Энергия существует во всевозможных формах, подобно кубикам в коробке, кубикам в раковине и т. д. Есть энергия, связанная с движением (кинетическая энергия); энергия, связанная с гравитационным взаимодействием (она называется потенциальной энергией тяготения); тепловая, электрическая и световая энергия; энергия упругости в пружинах; химическая энергия; ядерная энергия и, наконец, энергия, которой обладает частица в силу одного своего существования,— эта энергия прямо зависит от массы. Обнаружил ее, как вы знаете, Эйнштейн. Я имею в виду его знаменитое соотношение $E=mc^2$.

Итак, существует много видов энергии, и мы кое-что знаем об их взаимосвязи,— в этом вопросе мы не совсем невежественны. Например, то, что мы называем тепловой энергией, в значительной степени лишь кинетическая энергия движения частиц в теле. Упругая энергия и химическая энергия имеют одинаковое происхождение — силы взаимодействия между атомами. Когда атомы перестраиваются в другом порядке, меняется энергия, а если меняется эта величина, то должна измениться и какая-то другая. Например, если вы что-то сжигаете, меняется химическая энергия и вы обнаруживаете теплоту там, где ее раньше не было, ибо сумма энергий должна остаться прежней. Упругая энергия и химическая, обе связаны с взаимодействием атомов, и теперь нам известно, что эти взаимодействия являются комбинацией двух вещей — электрической энергии и опять-таки кинетической, только на этот раз формулу дает нам квантовая механика. Световая энергия — не что иное, как электромагнитная энергия, потому что свет теперь представляют себе как электрическую и магнитную волну. Ядерная энергия не выражается через другие виды энергии; сегодня я могу сказать только, что она — результат ядерных сил.

Закон сохранения энергии очень полезен в методическом отношении. Я приведу несколько простых примеров, чтобы показать вам, как, зная закон сохранения энергии и формулы для вычисления энергии, мы можем понять другие законы. Иными словами, многие другие законы не независимы, а являются как бы зашифрованными пересказами закона сохранения энергии. Простейший из них — правило рычага (рис. 19).

На шарнире — рычаг. Длина одного плеча 1 м, другого — 4 м. Прежде всего вспомним закон для энергии тяготения: если у вас есть несколько грузов, то вы берете вес каждого груза, умножаете его на высоту над землей,

складываете все вместе и получаете полную энергию тяготения. Пусть на длинном плече рычага груз массы 2 кг, на коротком — какой-то неизвестный груз массы $X$; $X$ — всегда неизвестная величина, поэтому давайте переименуем ее в $W$ и сделаем вид, будто мы знаем о ней больше, чем на самом деле. Теперь вопрос в том, каким должен быть

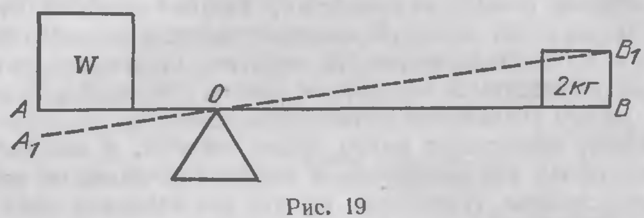



Рис. 19

груз $W$ для равновесия, чтобы рычаг тихо покачивался, но сильно не перекашивался? Если он тихо покачивается, то это означает, что энергия остается одинаковой и когда рычаг горизонтален, и когда он наклонен так, что груз в 2 кг поднялся, скажем, на 2 см. Раз энергия одинакова, рычагу безразлично, в каком он положении, и он не перекашивается. Если груз в 2 кг поднимается на 2 см, то насколько опускается груз $W$? Из рисунка ясно, что если $AO=1$ м, а $OB=4$ м, то при $BB_1=2$ см отрезок $AA_1$ будет равняться 0,5 см. Теперь применим закон для энергии тяготения. Вначале обе высоты $BB_1$ и $AA_1$ были равны нулю и общая энергия была равна нулю. Чтобы найти энергию повернувшегося рычага, мы умножаем вес груза массы 2 кг на высоту 2 см и складываем с неизвестным весом $W$, умноженным на высоту 0,5 см. Сумма должна дать прежнюю энергию — нуль. Поэтому

$$2-\frac{W}{4}=0, \text{ откуда } W=8.$$

Это один из способов понять простой закон — хорошо известное вам правило рычага. Но интересно, что не только этот, но и сотни других законов можно тесно связать с различными видами энергии. Я привел вам этот пример только для того, чтобы показать, насколько полезен закон сохранения энергии.

Но вся беда в том, что на практике он не выполняется из-за трения в шарнире. Если что-то движется, например по горизонтальному полу катится шарик, то рано или поздно трение его остановит. А куда же денется кинетическая энергия шарика? Энергия движения шарика пре-

вратится в энергию колебания атомов пола и атомов шарика. Мир, если смотреть на него издали, кажется круглым, гладким, чисто отполированным шариком, но если посмотреть на него вблизи, он оказывается очень сложным: миллиарды крохотных атомов, всевозможные неровности. Он похож на крупную гальку у нас под ногами, ибо состоит из этих крохотных шариков. Таков и пол — бугристая дорога, насыпанная из шариков. Когда вы катите чудовищный голыш по этой гальке, вы видите, что галька — маленькие атомы — начинает подпрыгивать. После того как шар прокатился, атомы, которые остались позади, продолжают дрожать от тех толчков и ударов, которые они претерпели. Так в полу остается тепловая энергия, колебания атомов. На первый взгляд кажется, что закон сохранения несправедлив, ибо энергия прячется от нас и нам нужны термометры и другие приборы, чтобы ее обнаружить. Но как бы ни был сложен процесс, мы всегда находим, что энергия сохраняется, даже если не знаем других, более детальных законов.

Впервые закон сохранения энергии был продемонстрирован не физиком, а медиком. Он экспериментировал на крысах. Если вы сожжете пищу, то сможете найти, сколько выделилось тепла. Если такое же количество пищи вы дадите крысе, то пища вместе с кислородом превратится в углекислый газ, так же как и при горении. Измерив энергию в обоих случаях, вы обнаружите, что в живых существах происходит то же самое, что и в неживой природе. Жизнь так же подчиняется закону сохранения энергии, как и другие явления. Кстати говоря, всякий закон или принцип, справедливый для «неживой» природы и поддающийся проверке на великом феномене жизни, оказывается справедливым и там. В том, что касается законов физики, до сих пор не обнаружено разницы между неживыми предметами и живыми существами, хотя последние могут быть устроены гораздо сложнее.

Количество энергии в пище говорит вам, сколько тепла, механической работы и т. д. она может произвести. Измеряют эту величину в калориях. Когда говорят о калориях в пище, это значит, что вы едите эти самые калории — они просто мера количества тепла, заключенного в пище. Физики иногда смотрят на других свысока и считают себя такими умными, что людям хочется поймать их на какой-нибудь ошибке. Я скажу вам, на чем их можно поймать. Им должно быть стыдно, что для измерения энергии они пользуются такой уймой способов и названий.

Разве не бессмыслица, что энергию измеряют в калориях, в эргах, в электрон-вольтах, в килограммометрах, в британских тепловых единицах, в джоулях, в киловатт-часах — столько мер для одной и той же величины? Вы можете подумать, что по крайней мере современные первоклассные-то физики-теоретики приняли общую единицу, но загляните в их статьи: тут энергию измеряют и в кельвинах, и в мегагерцах, а теперь еще и в обратных ферми — последняя новинка. Если кому-нибудь нужны доказательства, что физики не лишены человеческих слабостей, то вот вам одно из них — столь огромное число единиц для измерения энергии.

Многие явления природы задают нам интересные загадки в связи с энергией. Не так давно были открыты объекты, названные квазарами *). Они находятся на громадных расстояниях от нас и излучают в виде света и радиоволн так много энергии, что возникает вопрос, откуда она берется. Если энергия сохраняется, то состояние квазара после того, как он излучил такое чудовищное количество энергии, должно отличаться от первоначального. Вопрос в том, является ли источником энергии гравитация — не произошел ли гравитационный коллапс квазара, переход в иное гравитационное состояние? Или это мощное излучение вызвано ядерной энергией? Никто не знает. Вы скажете: «А может быть, закон сохранения энергии несправедлив?» Нет, когда явление исследовано так мало, как квазар (квазары настолько далеки, что астрономам нелегко их увидеть), и как будто бы противоречит основным законам, обычно оказывается, что не закон ошибочен, а просто мы недостаточно знаем явление.

Другой интересный пример использования закона сохранения энергии — реакция распада нейтрона на протон, электрон и антинейтрино. Сначала думали, что нейтрон превращается в протон и электрон. Но когда измерили энергию всех частиц, оказалось, что энергия протона и электрона меньше энергии нейтрона. Возможны были два объяснения. Во-первых, мог быть неправильным закон сохранения энергии. Бор **) предположил, что закон сохранения выполняется только в среднем, статистически. Но теперь выяснилось, что правильно другое объяснение: энергии не совпадают потому, что при реакциях возникает

---

*) Quasar — сокращение от quasi star — «будто бы звезда».— *Примеч. ред.*

**) Нильс Бор (1885—1962) — датский физик-теоретик.

еще какая-то частица — частица, которую мы называем теперь антинейтрино. Антинейтрино уносит с собой часть энергии. Вы скажете, что антинейтрино, мол, только для того и придумали, чтобы спасти закон сохранения энергии. Но оно спасает и многие другие законы, например закон сохранения количества движения, а совсем недавно мы получили прямые доказательства, что нейтрино действительно существует.

Этот пример очень показателен. Почему же мы можем распространять наши законы на области, подробно не изученные? Почему мы так уверены, что какое-то новое явление подчиняется закону сохранения энергии, если проверяли закон только на известных явлениях? Время от времени вы читаете в журналах, что физики убедились в ошибочности одного из своих любимых законов. Так, может быть, не нужно говорить, что закон выполняется в тех областях, куда мы еще не заглядывали? Но если вы никогда не скажете, что закон выполняется там, куда вы еще не заглядывали, вы ничего не узнаете. Если вы принимаете только те законы, которые относятся уже к проделанным опытам, вы не сможете сделать никаких предсказаний. А ведь единственная польза от науки в том, что она позволяет заглядывать вперед, строить догадки. Поэтому мы вечно ходим, вытянув шею. А что касается энергии, она, вероятнее всего, сохраняется и в других местах.

Вот почему наука недостоверна. Как только вы скажете что-нибудь об области опыта, с которой непосредственно не соприкасались, вы сразу же лишаетесь уверенности. Но мы обязательно должны говорить о тех областях, которых никогда не видели, иначе от науки не будет проку. Например, при движении тела его масса меняется из-за сохранения энергии. Из-за эквивалентности массы и энергии энергия, связанная с движением, проявляется как дополнительная масса. Двигаясь, тела становятся тяжелее. Ньютон был другого мнения. Он считал, что массы постоянны. Когда обнаружилось, что представления Ньютона неверны, все говорили: «Это ужасно! Физики нашли у себя ошибку! Почему же они думали, что они правы?» Эффект этот очень мал и проявляется только при скоростях, близких к скорости света. Если вы запустите волчок, то масса его останется такой же, как и в спокойном состоянии, с точностью до ничтожной дроби. Но тогда они должны были бы говорить так: «Если скорость не превышает такого-то значения, масса волчка не меняется». Все было бы

ясно, не правда ли? Но нет. Ведь опыты проводились только с деревянными, медными и стальными волчками, пришлось бы говорить: «Когда волчки, сделанные из меди, дерева и стали, крутятся не быстрее, чем с такой-то скоростью...» Как видите, мы не знаем всех условий, необходимых для опыта. Неизвестно, будет ли сохраняться масса радиоактивного волчка. Поэтому, если мы хотим, чтобы от науки была какая-то польза, мы должны строить догадки. Чтобы наука не превратилась в простые протоколы проделанных экспериментов, мы должны выдвигать законы, простирающиеся на еще не изведанные области. Ничего дурного тут нет, только наука оказывается из-за этого недостоверной. А если вы думали, что наука достоверна,— вы ошибались.

Итак, возвращаясь к нашему списку законов сохранения (см. табл. 1), мы можем внести туда энергию. Насколько нам известно, она сохраняется в точности. Элементарной единицы энергии не существует. Далее, является ли она источником поля? Да. Эйнштейн считал, что гравитация порождается энергией. Энергия эквивалентна массе, и, следовательно, мысль Ньютона, что гравитация порождается массой, трансформировалась в утверждение, что гравитацию производит энергия.

Существуют другие сохраняющиеся величины, подобные энергии в том смысле, что они являются числами. Одна из них — количество движения. Если взять все массы системы, перемножить их на скорости и сложить, то сумма будет количеством движения системы; полное количество движения системы сохраняется. Согласно нынешним представлениям энергия и количество движения тесно связаны, поэтому я поместил их в одном столбце.

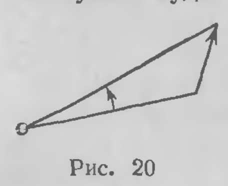



Рис. 20

Еще пример сохраняющейся величины — момент количества движения, о котором мы уже говорили. Например, если у нас есть движущееся тело и мы выберем произвольный центр, то скорость увеличения площади (рис. 20), описываемая отрезком, соединяющим тело с центром, умноженная на массу тела, называется моментом количества движения. Таким образом, момент количества движения численно равен площади, описываемой отрезком, соединяющим тело с центром, при движении тела за единицу времени. Сложив моменты всех тел, входящих в систему, мы получим момент количества движения системы.

Эта величина не меняется. Итак, мы имеем сохранение момента количества движения. Кстати, многим часто кажется, будто момент количества движения не сохраняется. Подобно энергии, он проявляется в различных формах. Большинство людей думают, будто он связан только с движением, но я покажу вам, что он проявляется и в других формах. Если в проволочную катушку вдвигать магнит, то магнитное поле, магнитный поток внутри нее, увеличится и по проводу пойдет электрический ток. Вообразите, что вместо провода — диск, в котором имеются электрические заряды наподобие электронов в проволоке (рис. 21). Теперь я пододвигаю издалека магнит, вдвигаю очень быстро вдоль оси, точно в середину, и магнитный поток изменяется. Так же как и в проволоке, магнитные заряды начинают двигаться по кругу, и, если диск насажен на подшипник, он закрутится. Это не похоже на сохранение момента: когда магнит далеко от диска, диск не поворачивается, а когда близко — диск крутится. Мы получили вращение задаром, а это против правил. «Ах, так, — скажете вы,— значит, должно существовать какое-то другое взаимодействие, заставляющее магнит крутиться в обратную сторону». Ничего похожего. На магнит не действует электрическая сила, которая стремилась бы повернуть его в обратную сторону. Все объясняется тем, что момент проявляется в двух формах. Одна из них — момент, связанный с движением, а другая — момент, связанный с электрическим и магнитным полями. Вокруг магнита существует поле со своим моментом, который не проявляется в движении, но по знаку противоположен вращению. Если мы проделаем опыт в обратном порядке (рис. 22), это станет еще яснее. Когда диск с заряженными частицами и магнит находятся рядом и оба неподвижны, я говорю, что поле обладает моментом, моментом в скрытой

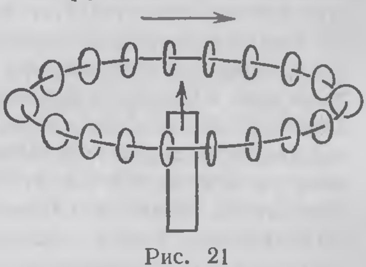


Рис. 21

Рис. 22

форме, не проявляющимся в механическом вращении. Когда же вы убираете магнит, поля разъединяются и момент количества движения должен теперь проявиться — диск закрутится. Причина, заставляющая его крутиться,— это явление электромагнитной индукции.

Меняется ли момент количества движения порциями, я затрудняюсь сказать. На первый взгляд он никак не может изменяться порциями, ибо зависит от того, под каким углом вы строите проекцию системы. Вы смотрите на изменяющуюся площадь и, естественно, видите ее по-разному в зависимости от того, смотрите ли вы на нее прямо или под углом. Если момент изменяется порциями и, глядя на систему под одним углом, вы нашли, что он равен 8 единицам, а потом чуть-чуть изменили угол, то число единиц изменится незначительно, скажем, станет чуть-чуть меньше 8. Но 7 не чуть-чуть меньше 8; 7 меньше 8 на вполне определенную величину, так что момент вряд ли может изменяться порциями. Однако тонкости и странности квантовой механики позволяют обойти это доказательство: если мы измерим момент количества движения относительно любой оси, он, как ни странно, всегда будет выражаться целым числом единиц. Правда, в отличие от электрического заряда, это не те единицы, которые можно подсчитать. Момент изменяется порциями в математическом смысле таким образом, что при любом измерении величина его выражается целым числом. Но мы не можем толковать его так же, как целое число единичных электрических зарядов — воображаемых единиц, которые мы можем пересчитать: одна, другая, третья... В случае момента количества движения мы не можем представить их себе как отдельные единицы, и тем не менее число их — всегда целое... Что крайне странно.

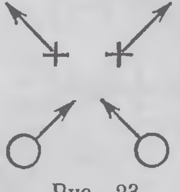


Рис. 23

Есть и другие законы сохранения. Они не так интересны, как те, о которых я рассказывал, и речь в них идет не о сохранении величины. Предположим, у нас есть устройство, в котором частицы движутся симметрично. Пусть их движениям свойственна двусторонняя симметрия (рис. 23). Тогда, согласно законам физики, при любых перемещениях и столкновениях вы можете ожидать, и ожидать не напрасно, что, взглянув на эту систему позже, вы обнаружите в ней прежнюю симметрию. Следовательно, существует еще один вид сохранения — сохранение характера симметричности. Полагалось бы и этот закон

занести в нашу таблицу, но тут не сохраняется никакая определенная величина, поддающаяся измерению. О законе сохранения симметрии мы поговорим подробнее в следующей лекции. Классическую физику он мало интересует потому, что такие красивые симметрические начальные условия там очень редки и практического значения он почти не имеет. В квантовой же механике, где мы имеем дело с очень простыми системами вроде атомов, их внутреннее строение часто бывает симметричным (например, с двусторонней симметрией) и характер симметрии сохраняется. Вот почему этот закон важен для понимания квантовых явлений.

Еще один интересный вопрос — заложен ли более фундаментальный принцип в законах сохранения или мы должны принимать их такими, как они есть? Этот вопрос я отложу до следующей лекции, но одну его сторону хочу отметить сразу. При популярном изложении этих разнообразных принципов они кажутся взаимно не связанными. Зато при более глубоком понимании вы обнаруживаете между ними тесную связь — каждый из них так или иначе подразумевает в себе остальные. Взять хотя бы связь между относительностью и локальным характером сохранения. Если бы я не пояснил эту связь примером, то могло бы показаться чудом, что из невозможности определить, как быстро вы движетесь, вытекает, что сохраняющаяся величина не может исчезнуть в одном месте и одновременно возникнуть в другом.

$x$ •

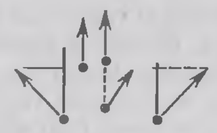


Рис. 24

Теперь я хотел бы показать вам, какова связь между сохранением момента количества движения, сохранением количества движения и сохранением некоторых других величин. При сохранении момента количества движения мы имеем дело с площадью, описываемой движущимися частицами. Если нам дано несколько частиц (рис. 24) и мы примем за центр очень далекую точку $x$, то расстояния до всех частиц будут почти одинаковы. В этом случае при вычислении площадей, или моментов количества движения, нужно учитывать только одно — составляющую скорости, которая на рис. 24 вертикальна. Мы обнаружим, что сумма

всех масс, умноженных на их вертикальные скорости, постоянна, ибо постоянен момент количества движения относительно любой точки, и если точка выбрана достаточно далекая, то момент зависит лишь от масс и скоростей. Таким образом, из сохранения момента количества движения вытекает сохранение количества движения. А оно в свою очередь подразумевает сохранение еще одной величины, настолько связанной с количеством движения, что я даже не стал вносить ее в табл. 1. Я имею в виду положение центра масс (рис. 25).

Масса в ящике не может переместиться из одного положения в другое просто так, сама по себе. Сохранение массы тут ни при чем: масса все время одна и та же, речь идет лишь о ее перемещениях. Заряд мог бы переместиться, а масса — нет. Позвольте объяснить, почему.

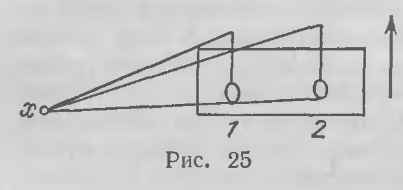


Рис. 25

Предположив, что ящик плавно идет вверх, найдем момент количества движения относительно не очень далекой точки $x$. Если при движении ящика вверх масса находится в положении *1*, то площадь, описанная ее радиусом, будет изменяться с определенной скоростью. Если масса передвинется в положение *2*, то площадь станет увеличиваться быстрее: высота будет прежней, потому что ящик поднимается с прежней скоростью, а расстояние от $x$ до массы увеличилось. Но, согласно закону сохранения момента, быстрота изменения площади не может изменяться. Поэтому масса не имеет права передвинуться сама по себе: вы должны что-то подтолкнуть или еще как-нибудь увеличить момент количества движения. Вот почему ракета не может двигаться в пустоте..., но движется. Если у вас несколько масс и одна двинулась вперед, то другие вынуждены двигаться назад, так чтобы перемещения вперед и назад взаимно уравновесились. Так работает ракета. Сначала она, скажем, неподвижно висит в пустоте, потом выбрасывает газ назад и из-за этого летит вперед. Главное — что все вещество, центр массы, масса в среднем, остается на прежнем месте. Нужная часть полетела вперед, а ненужная, нас не интересующая, отброшена назад. Теорем о сохранении только нужных вещей нет, они говорят лишь о сохранении всего в целом.

Поиски законов физики — это вроде детской игры в кубики, из которых нужно собрать целую картинку. У нас

огромное множество кубиков, и с каждым днем их становится все больше. Многие валяются в стороне и как будто бы не подходят к остальным. Откуда мы знаем, что все они из одного набора? Откуда мы знаем, что вместе они должны составить цельную картинку? Полной уверенности нет, и это нас несколько беспокоит. Но то, что у многих кубиков есть нечто общее, вселяет надежду. На всех нарисовано голубое небо, все сделаны из дерева одного сорта. Все физические законы подчинены одним и тем же законам сохранения.

# СИММЕТРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ

Для человеческого разума симметрия обладает, по-видимому, совершенно особой притягательной силой. Нам нравится смотреть на проявление симметрии в природе, на идеально симметричные сферы планет или Солнца, на симметричные кристаллы, на снежинки, наконец на цветы, которые почти симметричны. Однако сейчас мне хотелось бы поговорить не о симметрии предметов, а о симметрии самих законов физики. Что такое симметрия предмета — понять легко, но может ли быть симметричным физический закон? Нет, конечно, но физики получают особое удовольствие от того, что берут самые обыденные слова и используют их для обозначения совсем других понятий. В нашем случае некоторые свойства физических законов казались им очень похожими на те свойства предметов, которые определяют их симметрию, и физики стали говорить о симметрии физических законов. Вот о ней-то и пойдет здесь речь.

Что такое симметрия? Посмотрите на меня, и вы убедитесь, что моя левая половина симметрична правой, по крайней мере внешне. Точно так же или несколько иначе симметрична ваза. Что все это значит? Симметричность моего тела означает, что если перенести все, что у меня есть, справа налево и наоборот, т. е. если поменять эти две стороны местами, то я буду выглядеть точно так же, как и раньше. Особого вида симметрией обладает квадрат — его можно повернуть на 90°, и он снова будет выглядеть так же, как и прежде. Известный математик Герман Вейль *) предложил прекрасное определение симметрии, согласно которому симметричным называется такой предмет, который можно как-то изменять, получая в результате то же, с чего вы начали. Именно в этом смысле говорят о симметрии законов физики. При этом мы имеем в виду, что физические законы или способы их представления

*) Герман Вейль (1885—1955) — немецкий математик.

можно изменять так, что это не отражается на их следствиях. Этим свойством физических законов мы и займемся в данной лекции.

Простейшим примером симметрии такого рода — и вы сразу поймете, что это совсем не симметрия правого и левого,— может служить симметрия относительно пространственного переноса. Вот что мы имеем в виду. Если построить любую установку и при ее помощи поставить какой-нибудь опыт, а затем взять и построить точно такую же установку для точно такого же эксперимента с точно таким же объектом, но в другом месте, не здесь, а там, т. е. просто перенести наш опыт в другую точку пространства, то окажется, что во время обоих опытов происходит в точности одно и то же. Конечно, это утверждение не нужно понимать слишком упрощенно. Если бы я на самом деле построил здесь, где я сейчас сижу, какую-нибудь установку, а затем попытался перенести ее на 6 м влево, то она вошла бы в стену, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Поэтому, говоря о симметрии относительно пространственных переносов, необходимо учитывать все, что играет в эксперименте существенную роль, и переносить все это вместе с установкой. Возьмем, например, какую-нибудь систему с маятником и попробуем перенести ее на 20 тысяч миль вправо. Ясно, что система не будет работать правильно, так как колебания маятника зависят от притяжения Земли. Но если представить себе, что вместе с установкой я переношу и нашу планету, то система будет работать по-прежнему. В том-то и дело — нужно переносить сразу все, что имеет хоть малейшее значение. Это правило звучит довольно нелепо. В самом деле, можно просто перенести экспериментальную установку, а если она не заработает, сказать, что мы перенесли еще не все,— и вы оказываетесь правы и в том и в другом случае. Но на самом деле это не так, ибо вовсе не очевидно, что мы обязательно будем правы. Интереснейшее свойство природы как раз и заключается в том, что всегда удается перенести достаточно материала, чтобы установка вела себя, как и раньше. А это уже не пустые слова.

Мне хотелось бы на примере показать, что это утверждение правильно. Возьмем в качестве иллюстрации закон всемирного тяготения, утверждающий, что сила взаимного притяжения двух тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Напомню, что тела реагируют на силу изменением скорости в направлении силы. Возьмем теперь два тела, скажем, планету, вращаю-

щуюся вокруг Солнца, и перенесем эту пару в другую часть Вселенной. Расстояние между ними, естественно, не изменится и, следовательно, не изменяется и действующие между ними силы. Более того, в новой ситуации сохранится и скорость движения и все пропорции происходящих изменений, и в одной системе все будет происходить точно так же, как и в другой. Уже то, что в законе всемирного тяготения используется «расстояние между двумя телами», а не какое-то расстояние до центра Вселенной, показывает, что этот закон допускает переносы в пространстве.

Вот в этом и заключается одна из симметрий физических законов — симметрия относительно пространственных переносов. Другое свойство симметрии связано с тем, что для физических законов не существенны и сдвиги во времени. Запустим планету вокруг Солнца в определенном направлении. И предположим, что мы могли бы запустить ее же снова на 2 часа или на 2 года позже, запустить снова с самого начала точно таким же образом при точно таком же исходном расположении планет и Солнца, как и при первом запуске. Тогда все будет происходить точно так же, как и в первом случае, поскольку вновь закон всемирного тяготения говорит о скорости и нигде не пользуется понятием абсолютного времени, в определенный момент которого необходимо начать измерения. По совести говоря, именно в этом конкретном примере мы не очень уверены в справедливости наших утверждений. Когда мы говорили о законах гравитации, мы упомянули о возможности изменения гравитационных сил во времени. А это означало бы, что наше предположение о допустимости сдвигов во времени неверно. Ведь если гравитационная постоянная через миллиард лет окажется меньше, чем сейчас, то неверно утверждать, что через миллиард лет движение наших экспериментальных планет и Солнца будет точно таким же, как и сегодня. Но, насколько мы это знаем сейчас (а я говорю здесь о законах физики в том виде, в каком они нам известны сегодня,— хотя, поверьте, не отказался бы от возможности поговорить о них с позиций завтрашнего дня), сдвиг во времени не имеет никакого значения.

Известно, что в одном отношении это на самом деле не так. Это верно лишь в том, что касается законов физики. Но факты (а они могут сильно расходиться с известными нам законами) свидетельствуют, по-видимому, о том, что Вселенная имеет определенное начало во времени и что

сейчас эта Вселенная постоянно расширяется. Могут сказать, что здесь мы тоже должны воспроизводить «географические» условия, как и при пространственных переносах, когда мы вынуждены были переносить не только установку, но и все остальное. В том же самом смысле можно утверждать, что для переноса во времени справедливо аналогичное правило и что нам нужно смещать во времени процессы расширения Вселенной вместе со всем остальным. Тогда мы должны были бы проводить наш второй эксперимент. сдвигая во времени момент рождения нашей Вселенной. Но не нам создавать вселенные. На этот процесс мы не можем оказать никакого влияния, и мы не можем даже получить экспериментальным путем хоть какое-нибудь представление о нем. Поэтому настолько, насколько это касается точных наук, мы ничего не можем сказать по этому поводу. Просто-напросто дело в том, что условия существования Вселенной, по-видимому, меняются во времени и галактики непрерывно удаляются друг от друга, так что если бы в каком-нибудь научно-фантастическом романе вы проснулись где-то в неизвестном будущем, то, измерив средние расстояния между галактиками, вы смогли бы узнать, о каком времени идет речь. Это значит, что с течением времени Вселенная не будет выглядеть так же, как она выглядит сейчас.

Однако сегодня принято проводить грань между физическими законами, которые говорят о том, каким будет движение, если оно началось при определенных условиях, и утверждениями о том, как была создана наша Вселенная, поскольку о последнем мы знаем совсем мало. Обычно считают, что астрономическая история, или космогоническая теория,— это не совсем то же, что законы физики. Правда, если вы спросите меня, в чем тут разница, то я окажусь в затруднительном положении. Самая характерная черта физического закона — это его общность, но если на белом свете существует что-нибудь действительно общее, то это факт разбегания всех небесных тел. Поэтому я не знаю точно, в чем тут разница. Если же условиться не обращать внимания на процессы, связанные с возникновением Вселенной, а брать лишь настоящие физические законы, известные нам, то сдвиг во времени не будет играть никакой роли.

Приведем еще несколько примеров законов симметрии. Один из них связан с фиксированными пространственными поворотами. Если проводить какой-либо опыт с установкой, построенной в каком-нибудь определенном месте,

а затем взять другую точно такую же установку (возможно, перенесенную в другую точку пространства, где посвободнее) и повернуть ее так, чтобы все ее оси имели другую ориентацию, то установка будет работать точно таким же образом, как и раньше. Конечно, при этом нам снова нужно повернуть и все остальное, существенное для эксперимента. Если речь идет о дедовских часах и вы положите их на бок, маятник просто уткнется в стенку футляра и часы остановятся. Но если вместе с часами повернуть и Землю (которая и так все время поворачивается), часы будут идти по-прежнему.

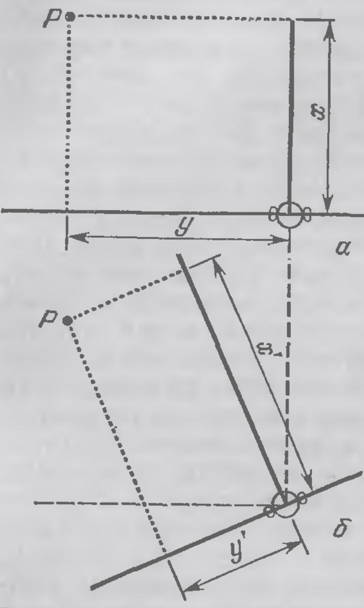



Рис. 26. *а* — положение точки *P* относительно меня характеризуется двумя числами *x* и *y*; число *x* показывает, насколько далеко вперед ушла от меня точка *P*, а число *y* — насколько она смещена влево. *б* — положение той же самой точки *P* характеризуется двумя другими числами, если я стою на прежнем месте, но повернулся в сторону

Математическое описание этой возможности поворота представляется довольно интересным. Для того чтобы описать, как протекает какой-либо процесс, мы пользуемся числами, показывающими, о каком месте идет речь. Эти числа называют координатами точки, и иногда нам приходится брать три числа, показывающих, как высоко над некоторой плоскостью расположена наша точка, как далеко она впереди или сзади (если число отрицательное) от нас и насколько она смещена от нас вправо или влево. Те, кто был в Нью-Йорке, знают, что устроенная таким образом нумерация улиц очень удобна, или, точнее, была удобна до тех пор, пока не изменили название Шестой авеню. Поворот в пространстве с математической точки зрения выглядит следующим образом. Если я указываю положение некоторой точки (рис. 26), сообщая ее координаты $x$ и $y$, а кто-то другой, повернувшись лицом в сторону, задает положение точки координатами $x'$ и $y'$, определенными относительно его собственного положения,

то, как легко видеть, моя координата $x$ представляет собой «смесь» обеих координат, вычисленных другим наблюдателем. Формула преобразования такова, что каждая координата $x$ и $y$ превращается в смесь двух координат $x'$ и $y'$. Так вот, законы природы должны быть такими, что если смешать координаты подобным образом и подставить полученные выражения в уравнения, эти уравнения должны сохранять свой вид. Именно в этом состоит математическое проявление указанной симметрии. Вы записываете уравнения в определенных символах, затем находите способ замены этих символов $x$ и $y$ на новые $x'$ и $y'$, каждый из которых связан со старыми $x$ и $y$ определенной формулой, и после замены уравнения по-прежнему выглядят так, как и раньше, разве что у $x$ и $y$ появились штрихи. А это в конечном счете означает, что другой наблюдатель увидит на своей установке точно то же, что я вижу в своей, хотя она и повернута.

Приведу еще один очень интересный пример закона симметрии. Он связан с равномерным движением по прямой. Считается, что законы физики не меняются при равномерном движении по прямой. Это утверждение получило наименование принципа относительности. Возьмем космический корабль, какое-нибудь устройство в нем, выполняющее определенную работу, и возьмем другое совершенно такое же устройство, установленное здесь, на Земле. Тогда, если космический корабль будет двигаться с постоянной скоростью, наблюдатель на борту корабля, изучающий поведение устройства, не заметит в нем ничего нового по сравнению со мной, наблюдающим поведение неподвижного устройства на Земле. Конечно, если движущийся наблюдатель выглянет в иллюминатор или налетит на какое-то препятствие, это совсем другое дело. Но в остальном, пока он движется с постоянной скоростью по прямой, законы физики кажутся ему точно такими же, что и мне. А раз это так, я не могу решить, кто же из нас движется.

Прежде чем идти дальше, мне хотелось бы подчеркнуть, что во всех этих преобразованиях и всех этих законах симметрии мы не говорили о переносе Вселенной в целом. В случае сдвигов по времени говорить о таком сдвиге для всех процессов Вселенной значило бы вообще ничего не сказать. Точно так же нет никакого разумного содержания и в утверждении, что если бы можно было перенести всю нашу Вселенную в другое место в пространстве, ничего не изменилось бы. Замечательно во всех этих законах вот что: если взять какую-то установку и перенести ее в

другое место, убедиться в выполнении целого ряда условий и перенести туда же достаточно дополнительных устройств, то окажется, что нам удалось выделить часть нашей Вселенной и переместить ее относительно оставшейся части, и это не приводит для наблюдаемого явления к каким-либо последствиям, все останется, как и раньше. В случае принципа относительности это значит, что тот, кто летит в космосе по прямой с постоянной скоростью относительно среднего положения нашей Вселенной, не заметит никаких признаков своего движения. Иначе говоря, опыты, поставленные внутри движущегося тела и не связанные с выглядыванием в окошко, не позволяют определить по каким-либо признакам, движемся ли мы относительно всех звезд в совокупности или нет.

Это утверждение было впервые высказано Ньютоном. Рассмотрим его закон всемирного тяготения. Он утверждает, что силы взаимодействия между массами обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними и что каждая сила вызывает изменение скорости. Предположим теперь, что мне удалось построить теорию движения планеты, вращающейся вокруг неподвижного Солнца, а мне хочется выяснить, что происходит с планетой, вращающейся около движущегося Солнца. Во втором случае все скорости отличны от тех, которые наблюдаются в первом случае, к их старым значениям нужно прибавить некоторую постоянную скорость. Но закон содержит утверждение лишь относительно *изменений* скорости, а поэтому на самом деле получается, что все силы, действующие на планету неподвижного Солнца, в точности такие же, как и для планеты дрейфующего Солнца, и, следовательно, все изменения скорости для обеих планет одинаковы. Поэтому любая дополнительная скорость, с которой мы начинаем во втором случае, сохраняет свое значение, и все изменения скорости накапливаются помимо этого. Окончательный результат таких математических рассуждений говорит, что если добавить всем телам постоянную скорость, то они по-прежнему в точности будут подчиняться тем же законам, что и раньше. Вот поэтому, изучая Солнечную систему и траектории движения планет вокруг Солнца, мы не можем решить, неподвижно ли Солнце относительно нашей Вселенной или оно движется. В соответствии с законом Ньютона такое движение Солнца никак не отражается на движении планет вокруг Солнца. Поэтому Ньютон добавлял: «Движение тел в пространстве относительно друг друга одно и то же, независимо от того,

неподвижно ли это пространство относительно звезд или движется по прямой с постоянной скоростью».

Время шло, и после Ньютона были открыты новые законы, и в их числе законы электродинамики Максвелла *). Одно из следствий законов электродинамики заключается в том, что должны существовать волны, электромагнитные волны (световые волны могут служить их примером), которые распространялись бы со скоростью 299 792 км/с, ни больше, ни меньше. То есть именно 299 792 км/с, что бы там ни было. Но тогда нетрудно решить, что же находится в покое, а что движется, так как закон, согласно которому свет распространяется со скоростью ~ 300 000 км/с, наверняка (с первого взгляда) не таков, чтобы позволить наблюдателю двигаться без каких-либо видимых изменений. Очевидно, не правда ли, что если вы находитесь в космическом корабле и летите со скоростью 200 000 км/с в каком-то направлении, а я останусь на Земле и направлю пучок света, распространяющийся со скоростью 300 000 км/с, через маленькую дырочку в вашей кабине, то, поскольку вы движетесь со скоростью 200 000 км/с, вам будет казаться, что свет распространяется лишь со скоростью 100 000 км/с. Но, как выяснилось, если действительно поставить такой эксперимент, то вам будет казаться, что свет распространяется со скоростью 300 000 км/с относительно вас, а мне — что он распространяется со скоростью 300 000 км/с относительно меня!

Явления природы не так-то просто понять, и описанный экспериментальный факт настолько противоречил здравому смыслу, что и сейчас еще находятся люди, не верящие в этот результат! Но раз за разом опыты показали, что скорость распространения света равна 300 000 км/с независимо от того, как быстро мы сами движемся. Возникает вопрос, как же это может быть. Эйнштейн, так же как и Пуанкаре **), понял, что единственное объяснение, позволяющее двум движущимся относительно друг друга наблюдателям получать одинаковое значение скорости света, заключается в том, что их восприятие времени и пространства неодинаково, что часы космического корабля идут не так, как на Земле, и т. д. Вы можете возразить: «Но если часы все же идут и я, находясь в космическом

---

*) Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) — первый профессор экспериментальной физики в Кембриджском университете.

**) Жюль Анри Пуанкаре (1854—1912) — французский математик, физик и философ.

корабле, стану наблюдать за ними, то я смогу заметить, что они отстают». Нет, не можете, часы вашего мозга также будут идти медленнее обычного! Вот так, предусмотрев соответствующие изменения абсолютно всех процессов, происходящих в космическом корабле, удалось сочинить теорию, в соответствии с которой скорость света в космическом корабле равна 300 000 космических километров в космическую секунду, а здесь, на Земле,—300 000 моих километров в мою секунду. Это очень хитрая теория, и достойно удивления уже то, что построить такую теорию вообще оказалось возможным.

Я уже упоминал об одном из следствий принципа относительности, а именно о невозможности определить изнутри скорость движения по прямой. Помните, в предыдущей лекции речь шла о двух космических кораблях *A* и *B* (см. рис. 18). В каждом конце корабля *B* происходило некоторое событие. Человек, стоящий посредине этого корабля, утверждал, что два события ($x$ и $y$) в двух противоположных концах его корабля произошли одновременно, так как, стоя посреди корабля, он увидел световой сигнал о каждом из этих событий одновременно. Но человек, находившийся в корабле *A*, движущемся в это время с постоянной скоростью по отношению к кораблю *B*, увидел оба эти явления не сразу, а сначала $x$ и уж потом $y$, так как световой сигнал о событии $x$ дошел до него раньше, чем сигнал о событии $y$. Ведь он двигался вперед. Вы видите одно из следствий симметрии относительно прямолинейного движения с постоянной скоростью (где слово «симметрия» должно означать, что вы не можете решить, чья точка зрения правильна); когда я говорю, что событие происходит в мире «сейчас», в этом нет никакого смысла. Если вы движетесь по прямой с постоянной скоростью, то события, которые кажутся вам одновременными, это не те события, которые кажутся одновременными мне, хотя бы в тот самый момент, когда я наблюдаю одновременные события, мы и находились в одной точке. Нам не удастся договориться, что следует понимать под словом «сейчас» на расстоянии. А это приводит к необходимости коренных изменений наших представлений о пространстве и времени, чтобы можно было сохранить принцип, согласно которому нельзя обнаружить изнутри равномерное движение по прямой. Ведь получается, что с одной точки зрения два события кажутся одновременными, а с другой — нет, если они происходят не в одном месте, а разнесены на определенное расстояние.

Нетрудно видеть, что это очень напоминает преобразование пространственных координат. Если я встану лицом к аудитории, то рампа эстрады, на которой я нахожусь, оказывается на одном уровне со мной. У нее постоянное $x$ и меняющиеся значения $y$. Но если я повернусь на 90° и посмотрю на те же стены, но уже с новой точки зрения, то одна из них окажется впереди меня, а другая сзади, и им соответствуют разные значения $x'$. Точно таким же образом два события, которые с одной точки зрения кажутся одновременными (одно и то же значение $t$), с другой — могут казаться происходящими в разные моменты времени (разные значения $t'$). Другими словами, мы обобщаем здесь поворот в двумерном пространстве, о котором речь шла раньше, на случай пространства и времени, образующих вместе четырехмерную вселенную. Добавление времени в качестве новой координаты к трем пространственным координатам — это не просто искусственный прием, как объясняется в большинстве научно-популярных книг, где говорится: «Мы добавляем временну́ю координату к пространственным, потому что нельзя ограничиться указанием местоположения точки, нужно сказать еще и когда». Все это верно, но это не привело бы еще к образованию настоящего четырехмерного мира. Это означало бы лишь положить рядом две разные вещи. Настоящее пространство в известном смысле характеризуется тем, что оно существует само по себе, независимо от какой-то частной выбранной точки зрения, и когда мы смотрим под разными углами, часть того, что «спереди» или «сзади», может смешаться с тем, что «справа» или «слева». Точно так же и то, что «было» или «будет» во времени, может частично смешиваться с тем, что «там» или «здесь» в пространстве. Пространство и время оказываются неразрывно связанными между собой. После этого открытия Минковский заметил, что «отныне пространство само по себе и время само по себе должны обратиться в фикции и лишь некоторый вид соединения обоих должен еще сохранить самостоятельность».

Этим конкретным примером я занимаюсь так подробно потому, что, по сути дела, именно отсюда и начинается настоящее изучение симметрий физических законов. Именно Пуанкаре предложил исследовать, что можно делать с уравнениями, не меняя при этом их вида. Именно ему принадлежит идея обратить внимание на свойства симметрии физических законов. В симметрии относительно пространственных переносов, сдвигов во времени и т. п.

не было особой глубины. Симметрия же относительно равномерного прямолинейного движения очень интересна, и из нее вытекают самые разнообразные следствия. Более того, эти следствия можно распространять на законы, которых мы не знаем. Например, предполагая, что этот принцип справедлив и для распада $\mu$-мезонов, мы можем утверждать, что при их помощи нельзя узнать, как быстро движется космический корабль. А это значит, что мы знаем хоть что-то о законах $\mu$-мезонного распада, хотя у нас нет никаких сведений о том, чем же, собственно, вызывается этот распад.

У физических законов есть немало и других свойств симметрии, и некоторые из них совсем другого рода. Я упомяну только несколько. Одно из подобных свойств состоит в том, что один атом можно заменить другим того же типа и это никак не скажется на любом явлении. Позволительно спросить: «А что значит одного типа?» И мне остается только ответить, что однотипные атомы позволяют заменять один другим без каких-либо последствий! Не правда ли, создается впечатление, что физики все время занимаются какой-то бессмыслицей. Атомы бывают разных типов, и если вы замените один атом атомом другого типа, то что-то изменится, а если того же типа, то ничего не изменится — и мы никогда не выйдем из заколдованного круга. Но настоящий смысл нашего утверждения состоит в том, что атомы одного типа *существуют*, что *можно* найти такие группы или классы атомов, в которых замена одного атома другим не будет иметь никакого значения. А так как количество атомов в таком крошечном кусочке вещества, как моль данного вещества, оценивается числом с 23 нулями, нам очень важно, что некоторые из них одинаковы, что не все они совершенно различны. На самом деле очень важно, что мы можем разделить их на конечное число (несколько сотен) различных типов, а раз это так, то наше утверждение о том, что один атом можно заменить без каких-либо последствий другим, однотипным, несет совсем немало информации. Наиболее важно это для квантовой механики. К сожалению, я не могу объяснить этого здесь, отчасти (и только отчасти) потому, что лекция предназначена аудитории без математической подготовки. Но и для подготовленного читателя это хитрый вопрос. В квантовой механике утверждение, что один атом можно заменить другим, однотипным, приводит к удивительным следствиям. Оно объясняет странное явление, наблюдаемое в жидком гелии, который течет по трубам, не испытывая

какого-либо сопротивления, просто течет себе и течет и так никогда и не останавливается. Оно даже лежит в основе всей периодической системы элементов и объясняет, откуда берутся те силы, что не дают мне провалиться сквозь пол. Здесь я не могу говорить обо всем этом подробно, но мне хочется подчеркнуть важность исследования этих принципов.

Теперь вам может показаться, что все законы физики симметричны относительно любых изменений. Чтобы вы так не думали, я приведу несколько примеров. Первый из них — изменение масштаба. Неверно, что если вы построите одну установку, а затем другую, каждая деталь которой будет точным повторением соответствующей детали предыдущей установки и будет сделана из того же материала, но только в два раза крупнее, то она будет работать точно таким же образом, что и первая. Те, кто уже привык иметь дело с атомами, знают об этом, так как если я уменьшу установку в десять миллиардов раз, то на нее придется около пяти атомов, а из пяти атомов не сделаешь, например, станка. Совершенно очевидно, что так сильно мы не можем менять масштаб. Но это было ясно и до того, как начала проясняться атомарная картина мира. Возможно, вы время от времени обращали внимание на статьи в газетах, в которых говорится, что кто-то построил собор из спичек — многоэтажный, гораздо более готический, чем самый готический из соборов, и такой изящный и т. д. Почему же мы никогда не строим таких же настоящих соборов из огромных бревен, с той же степенью изящества, с тем же вкусом к деталям? Ответ таков — если бы вы построили такой собор, то он оказался бы настолько высоким и тяжелым, что рухнул бы. Да! Ведь мы забыли, что, сравнивая две вещи, нужно менять все, что входит в систему! На маленький собор действуют силы притяжения Земли, так что для сравнения необходимо, чтобы на большой собор действовали силы Земли, увеличенной в нужное число раз. Это еще хуже. Земля бо́льших размеров будет еще сильнее притягивать, а тогда ваши балки и подавно сломаются.

Тот факт, что законы физики не остаются неизменными при изменении масштаба, впервые был обнаружен Галилеем. Рассуждая о прочности костей и балок, он приводит такие соображения. Если вам требуются кости для более крупного животного, которое, скажем, в два раза выше, толще и длиннее нормального, то вес этого животного увеличится в восемь раз, и, следовательно, вам нужны

кости, которые выдерживали бы восьмикратную нагрузку. Но прочность кости зависит от размеров ее поперечного сечения, а поэтому если вы увеличите все кости по сравнению с прежним в два раза, то их поперечное сечение увеличится лишь в четыре раза, и, следовательно, они смогут выдерживать лишь четырехкратную нагрузку. В его книге «Диалог о двух новых науках» вы найдете рисунки воображаемых костей гигантской собаки совершенно других пропорций. Мне кажется, Галилей считал, что открытие этого факта несимметричности законов природы относительно изменения масштаба не менее важно, чем открытые им законы движения, и именно поэтому он включил и то и другое в свою книгу «Диалог о двух новых науках».

Вот еще один пример асимметрии закона физики. Если вы вращаетесь с постоянной угловой скоростью в космическом корабле, то неправильно было бы утверждать, что вы этого не заметите. Напротив. У вас начнется головокружение. Появятся и другие признаки: все предметы будут отброшены к стенам центробежной силой (называйте ее, как хотите — я надеюсь, что в этой аудитории нет преподавателей физики для первокурсников, которые захотели бы поправить меня). Определить, что Земля вращается, можно при помощи маятника или гироскопа, и вы, возможно, слышали, что в различных обсерваториях и музеях имеются маятники Фуко *), которые служат для доказательства факта вращения Земли без наблюдения за звездами. Мы можем, не выглядывая наружу, сказать, что мы вращаемся с постоянной угловой скоростью на Земле, потому что при таком движении законы физики не остаются неизменными.

Многие указывают на то, что на самом деле Земля вращается относительно галактик, и говорят, что если бы мы поворачивали галактики вместе с Землей, то законы не изменились бы. Ну, я лично не знаю, что произошло бы, если бы мы могли поворачивать всю Вселенную, и в настоящее время мы даже не знаем, как за это взяться. Точно так же в настоящее время у нас нет теории, которая описывала бы влияние галактик на земные явления так, чтобы из нее (естественным образом, а не в результате обмана или натяжек) следовало, что инерция вращения, эффекты вращения, скажем, вогнутая форма поверхности воды во

---

*) Жан Фуко (1819—1868) — французский физик-экспериментатор.

вращающемся ведерке — все это объяснялось действием сил, создаваемых предметами, находящимися в непосредственной близости. Пока не известно, справедливо это или нет. Что так должно быть, говорится в принципе Маха, но справедливость этого принципа еще не была доказана. Экспериментально проще ответить на такие вопросы. Если мы вращаемся с постоянной скоростью относительно туманностей, наблюдаем ли мы при этом какие-либо специфические явления? Да. А если мы движемся в космическом корабле по прямой с постоянной скоростью относительно туманностей, увидим ли мы в этом случае какие-либо специфические явления? Нет. Это совершенно разные вещи. Нельзя утверждать, что всякое движение относительно. Не в этом содержание принципа относительности. Он утверждает лишь, что нельзя обнаружить изнутри равномерного и прямолинейного (относительно туманностей) движения.

Еще один закон симметрии, о котором я хочу поговорить теперь, интересен и сам по себе, и своей историей. Он связан с вопросом о зеркальном пространственном отражении. Пусть я построил какую-то установку, скажем часы, а затем вблизи построил другие часы, являющиеся зеркальным отображением первых. Они подходят друг к другу, как две перчатки, правая и левая; каждая пружина, которая заводится в одних часах в одну сторону, в других часах заводится в другую и т. д. Я завожу и те и другие часы, ставлю на них одинаковое время, и пусть они себе идут. Вопрос — будут ли они показывать всегда одно и то же время или нет? Будет ли весь механизм одних часов, как в зеркале, повторять поведение другого? Не знаю, какой ответ на эти вопросы покажется вам правильным. Вероятнее всего, положительный, так думает большинство. Конечно, мы не имеем сейчас в виду географию. Пользуясь географией, мы можем разобраться, где право и где лево. Мы можем сказать, например, что если мы находимся во Флориде и повернемся лицом к Нью-Йорку, то океан окажется у нас справа. Это позволяет различать право и лево, и если в наших часах используется морская вода, то зеркальное отображение часов не будет ходить, так как соответствующая часть механизма не попадет в воду. Тогда вам пришлось бы предположить, что для вторых часов изменилась и география Земли: вы помните, зеркально отобразиться должно все существенное. Нас не интересует сейчас и история. Если вы раздобудете на заводе винт, то, вероятнее всего, у него будет правая резьба,

и вы можете утверждать, что вторые часы не будут вести себя точно так же, поскольку для них будет труднее достать нужные винтики. Но это относится лишь к характеру вещей, которые обычно выпускает наша промышленность. Так или иначе, вероятнее всего, что наше первое предположение будет таким: зеркальное отображение ничего не меняет. В самом деле, законы тяготения, оказывается, таковы, что в часах, действие которых основано на этих законах, ничего не изменится. Подобным же свойством обладают и законы электричества и магнетизма, так что, если в наших часах есть к тому же и электрическая или магнитная начинка, какие-то там провода, токи и т. п., вторые часы будут по-прежнему работать в полном согласии с первыми. Ничего не изменится также, если в наших часах используются обычные ядерные реакции. Но есть явления, для которых эта разница существует, и я сейчас перейду к этому вопросу.

Возможно, вы слышали, что измерять концентрацию сахара в воде можно, пропуская через воду поляризованный свет. Так вот, возьмем кусок поляроида *), пропускающего лишь свет с определенной поляризацией, и пропустим луч света через него и через сахарный раствор. Мы увидим, что если после прохождения через сахарный раствор луч пройдет еще через один кусок поляроида, то чем толще пройденный слой раствора, тем больше вправо нужно будет повернуть второй кусок поляроида, чтобы на выходе увидеть луч света. Теперь, если вы попробуете пропускать свет через тот же раствор, но в обратном направлении, то окажется, что вам снова придется поворачивать выходной кусок поляроида вправо. Вот мы и получили разницу между правым и левым. Сахарный раствор и пучок света можно использовать в часах. Пусть у нас есть сосуд с сахарной водой и мы пропускаем через него луч света, а второй кусок поляроида повернули так, что он пропускает весь свет. Предположим затем, что мы воспроизведем зеркальное отображение всей этой конструкции во вторых часах, надеясь, что плоскость поляризации света повернется влево. Ничего не выйдет. Свет, как и в первых часах, будет поворачиваться вправо, и второй кусок поляроида его не пропустит. Значит, при помощи сахарного раствора мы сможем обнаружить разницу между нашими двумя часами.

---

*) Пленочный материал для изготовления оптических поляризаторов.— *Примеч. ред.*

Это замечательный факт, и с первого взгляда кажется, что физические законы не обладают симметрией относительно зеркальных отображений. Но сахар, которым мы пользовались во время наших опытов, вероятнее всего, изготовлен из сахарной свеклы. Молекулы же сахара сравнительно просты, и их можно воспроизвести в лаборатории из углекислого газа и воды после большого числа промежуточных преобразований. Так вот, если вы поставите аналогичный опыт с искусственным сахаром, который химически ничем не отличается от обычного, то окажется, что поляризация света при этом вообще не меняется. Сахаром питаются бактерии, и если внести бактерии в водный раствор искусственного сахара, то окажется, что они съедают лишь половину сахара, и после того, как они съедят ее, плоскость поляризации света, пропускаемого через оставшуюся сахарную воду, станет поворачиваться *влево*. Это можно объяснить следующим образом. Сахар представляет собой сложную молекулу, некоторый набор атомов, образующих сложную конструкцию. Если собрать конструкцию, представляющую собой зеркальное отображение первой, сохраняя все расстояния между любыми парами атомов и энергию молекул, то для всех химических явлений, не затрагивающих процессов жизни, они неразличимы. Но живые существа различают эти два типа молекул. Например, бактерии едят лишь молекулы одного типа и не едят молекул другого. Тот сахар, который получается из сахарной свеклы, состоит из молекул только одного сорта, только правосторонних молекул, и поэтому поляризует свет только в одном направлении. Только такого типа молекулы съедобны для бактерий. Но когда мы синтезируем сахар из веществ, которые сами по себе не являются асимметричными, а представляют собой простые газы, мы синтезируем молекулы обоих типов в равных количествах. Если теперь в такой сахар попадают бактерии, то они съедают молекулы одного типа и оставляют нетронутыми молекулы другого. Вот почему поляризация света оставшейся сахарной водой изменяется в другом направлении, чем обычно. Как выяснил Пастер *), эти два типа сахара можно различать, рассматривая их кристаллы под микроскопом. Мы можем с полной определенностью показать, что все это действительно так, и мы можем разделять оба типа сахара, не дожидаясь помощи бактерий, если нам это понадобится. Но гораздо интереснее, что это

*) Луи Пастер (1822—1895) — французский бактериолог.

*умеют* и бактерии. Значит ли это, что жизненные процессы не подчиняются обычным физическим законам? По-видимому, нет. Похоже, что в живых организмах много-много очень сложных молекул и что у всех у них есть определенная ориентация. Одними из наиболее характерных молекул живых организмов являются белковые молекулы. Такие молекулы закручиваются в виде штопора, причем закручиваются вправо. Настолько, насколько можно утверждать сейчас, если бы нам удалось создать химическим путем точно такие молекулы, но закрученные влево, а не вправо, то эти молекулы не смогли бы выполнять своих биологических функций, так как, столкнувшись с другими белковыми молекулами, они не смогут взаимодействовать с ними обычным образом. Левая резьба подходит к левой резьбе, но не подходит к правой. Вот почему бактерии с правой резьбой в своем химическом нутре могут отличить правый сахар от левого.

Как же так получилось? Физики и химики не могут различать таких молекул и могут синтезировать лишь молекулы обоих видов, а биология может. Можно думать, что объясняется это так: давным-давно, когда жизнь только зарождалась, случайным образом возникла одна молекула, которая стала затем размножаться самовоспроизведением и т. д. до тех пор, пока много-много лет спустя не появились эти забавные бурдюки с разветвляющимися на концах отростками, которые могут стоять и без конца очень быстро говорить что-то друг другу... Но ведь мы всего лишь потомки этих первых нескольких молекул, и чисто случайно оказалось, что у этих первых молекул одна ориентация, а не другая. Эти молекулы могли быть либо одного типа, либо другого, либо с левой, либо с правой ориентацией, а затем они начали воспроизводиться и размножаться и усложнялись все дальше и дальше. Собственно, таким же образом обстоит дело и с нарезанием винтов в промышленности. Пользуясь винтами с правой резьбой, вы делаете новые винты с правой резьбой и т. д. Тот факт, что все молекулы живых организмов имеют одинаковое «направление резьбы», по-видимому, глубочайшим образом доказывает, что все живое на Земле произошло от одних и тех же предков на молекулярном уровне.

Для того чтобы лучше разобраться в вопросе о том, симметричны ли законы физики относительно изменения правого на левое и наоборот, мы можем сформулировать его следующим образом. Предположим, что мы разговариваем по телефону с каким-нибудь жителем Марса или

звезды Арктур и хотим рассказать ему, как все выглядит здесь, на Земле. Прежде всего, как объяснить ему значение слов? Этот вопрос тщательно исследовал профессор Морисон *) из Корнеллского университета. Он предлагал такой способ: начать говорить ему «тик, раз; тик, тик, два; тик, тик, тик, три; ...» и т. д. Довольно скоро наш приятель научился узнавать числа. Как только он разберется в нашей системе счисления, вы можете написать ему целую последовательность чисел, соответствующих относительным массам различных атомов, а затем продиктовать «водород 1,008», затем дейтерий, затем гелий и т. д. Посидев некоторое время над сообщенными ему числами, наш приятель догадается, что они совпадают с известными ему отношениями весов элементов и что, следовательно, сопровождающие их слова должны быть названиями этих элементов. Так мало-помалу мы можем построить общий язык. Но здесь возникают проблемы. Представьте себе, что вы совсем уже привыкли к нашему новому знакомому, и в один прекрасный день вы слышите: «А знаете ли, вы удивительно мне симпатичны. Хотелось бы знать, как вы выглядите». Вы начинаете: «Наш рост что-то около одного метра восьмидесяти сантиметров».— «Один метр восемьдесят сантиметров? А что такое метр?» — спрашивает он. «Ну, это очень просто: сто восемьдесят сантиметров — это в восемнадцать миллиардов раз больше размера атома водорода»,— говорите вы. И это не шутка — это один из способов объяснить, что такое 1,80 м кому-нибудь, кто пользуется другой мерой длины, при условии, что вы не можете послать ему какой-нибудь эталон и что у вас нет какого-либо предмета, который виден и вам, и ему. Итак, мы можем сообщить нашему знакомому свои размеры. Это возможно потому, что законы физики не остаются неизменными в результате изменения масштаба, и, следовательно, мы можем этим воспользоваться для того, чтобы определить, каким же масштабом каждый из нас пользуется. Вот так мы и описываем себя: рост — 1,80 м, внешняя симметрия, конечности и т. д. Затем наш марсианин говорит: «Все это очень интересно, но как вы устроены внутри?» Тогда мы рассказываем ему про сердце и про все остальное и говорим: «Сердце расположено слева». Все упирается в то, как объяснить марсианину, что такое лево и что такое право. «Ну,— скажете вы,— возьмем сахарную свеклу, сделаем сахар, растворим его в воде

*) Филип Морисон — американский физик.

и окажется...», но то-то и оно, что на Марсе не растет сахарная свекла. Да, кроме того, нам никак не узнать, не привела ли случайность в начале эволюции жизни на Марсе (даже если она привела к возникновению белков, аналогичных здешним) к выделению противоположной ориентации. Так что мы не знаем, как ему объяснить это. Поразмыслив на эту тему довольно долго, вы это поймете и решите, что это вообще невозможно.

Но приблизительно пять лет тому назад был проделан один эксперимент, результаты которого были сплошной загадкой. Я не буду здесь вдаваться в подробности, но мы оказывались во все большем и большем затруднении, во все более и более парадоксальном положении, пока, наконец, Ли и Янг *) не высказали предположения, что, может быть, принцип симметрии относительно правого и левого, согласно которому природа не реагирует на зеркальное отображение, неверен, и тогда это позволит разрешить целый ряд загадок. Ли и Янг предложили некоторые более прямые экспериментальные доказательства, и я очень коротко расскажу о самом прямом из них.

Возьмем явление радиоактивного распада, в котором испускаются электрон и нейтрино, например то, о котором мы уже говорили раньше и которое связано с распадом нейтрона на протон, электрон и антинейтрино. Есть еще много других реакций радиоактивного распада, при которых заряд ядра увеличивается на единицу и испускается электрон. Но здесь интересно вот что: если измерить вращение этого электрона — а электроны испускаются, вращаясь вокруг собственной оси, то окажется, что все они вращаются справа налево (если смотреть им вслед, т. е. когда они испускаются в южном направлении, то вращаются так же, как и Земля). В том, что испускаемые электроны всегда вращаются в одном направлении, что у них, так сказать, левосторонняя ориентация, есть определенный смысл. Дело здесь обстоит так, как будто при β-распаде у ружья, стреляющего электронами, нарезной ствол. Нарезать ствол можно двумя способами. Здесь всегда есть направление «наружу», и у вас всегда есть выбор нарезать ствол так, чтобы пуля вращалась либо справа налево, либо слева направо. Наш эксперимент показывает, что электронами стреляют из оружия, нарезанного справа

---

*) Ли Тзундао и Янг Чженьнин — работающие в США китайские физики, получившие совместно Нобелевскую премию по физике в 1957 г.

налево. Поэтому, используя этот факт, мы можем позвонить нашему марсианину и сказать: «Послушай-ка, возьми радиоактивное вещество, нейтрон, и понаблюдай за электронами, испускаемыми при β-распаде. Если электрон выстреливается вертикально вверх, то направление его вращения из-за спины в тело будет *слева*. Так ты и узнаешь, где левая сторона. Именно с этой стороны расположено сердце». Так что отличить правое от левого можно, а значит, закон о симметрии мира относительно правого и левого рухнул.

Следующее, о чем я хочу поговорить, это об отношении законов симметрии к законам сохранения. В предыдущей лекции мы говорили о принципах сохранения — сохранения энергии, количества движения и т. п. Исключительно интересно, что между законами сохранения и законами симметрии существует, по-видимому, глубокая связь. Эта связь получает свое объяснение, по крайней мере на нашем сегодняшнем уровне знаний, только в квантовой механике. Тем не менее я покажу вам одно проявление этой связи.

Предположим, что законы физики допускают формулировку, основанную на принципе минимума. Тогда можно показать, что из любого закона, допускающего перенос экспериментальной установки, т. е. допускающего пространственные переносы, вытекает закон сохранения количества движения. Между законами симметрии и законами сохранения имеется глубокая связь, но эта связь покоится на принципе минимума. В нашей второй лекции мы говорили о возможности сформулировать физические законы, утверждая, что частица переходит из одного положения в другое за заданный промежуток времени, пробуя различные пути. Существует определенная величина, которую, может быть не очень удачно, называют действием. Если вычислить действие для различных путей перехода, то окажется, что для реального пути, выбранного частицей, это действие всегда меньше, чем для любого другого. Поэтому при новом способе формулировки законов природы мы утверждаем, что для реального пути действие, вычисляемое по определенной математической формуле, всегда меньше, чем для любых других путей. Но вместо того, чтобы говорить о минимуме чего-то, можно сказать, что если путь немножко изменить, то сначала почти ничего не изменится. Представьте себе, что вы гуляете по холмам (по гладким, конечно, поскольку все математические выражения, о которых идет речь, гладкие) и приходите

на самое низкое место. Тогда если вы чуть-чуть шагнете в сторону, высота вашего места почти не изменится. Если вы находитесь в самой низкой или самой высокой точке, один шаг не играет никакой роли, в первом приближении он не оказывает никакого влияния на вашу высоту над уровнем моря,— ведь это не то, что на крутом склоне, где вы за один шаг заметно спускаетесь или поднимаетесь в зависимости от того, в каком направлении вы идете. Теперь вам, наверное, понятно, почему один шаг из самой низкой точки не играет роли. Если бы это было не так, то шаг в другом направлении означал бы, что вы спускаетесь. Но так как вы находились перед этим в самой низкой точке, и, следовательно, спуститься ниже уже нельзя, то в качестве первого приближения можно считать, что один шаг не играет никакой роли. Поэтому мы знаем, что если путь немножко изменить, то это в первом приближении не изменит действия. Нарисуем какой-нибудь путь, соединяющий точки *A* и *B*, и другой возможный путь следующего вида (см. рис. 27). Сначала мы перепрыгиваем сразу в близлежащую точку *C*, а затем движемся точно по такому же пути, как и раньше, до другой точки *D*, отстоящей от *B* на то же расстояние, что и *C* от *A*, поскольку оба пути абсолютно идентичны. Но, как мы только что установили, законы физики таковы, что общая величина действия при движении по пути *ACDB* в первом приближении совпадает с действием при движении по первоначальному пути *AB* — в силу принципа минимума, если *AB* — реальный путь. Но это еще не все. Действие при движении по исходному пути от *A* до *B* должно совпадать с действием при движении от *C* до *D*, если мир не меняется при пространственных переносах, так как разница между этими двумя путями лишь в пространственном сдвиге. Поэтому если принцип симметрии относительно пространственных переносов справедлив, то действие при движении по пути от *A* до *B* должно быть таким же, как и на пути от *C* до *D*. Однако для настоящего движения действие для сложной траектории *ACDB* почти в точности совпадает с действием для траектории *AB* и, следовательно, с действием для одной своей части, от *C* до *D*. Но действие для сложного пути представляет собой сумму трех частей: действие для движения от *A* до *C*, от *C* до *D* и от *D* до *B*. Поэтому, вычитая равное из равного, мы увидим, что вклад от движения от *A* до *C*

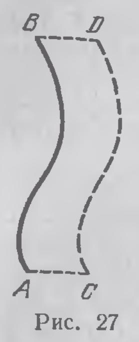


Рис. 27

и от $D$ до $B$ должен в сумме давать нуль. Но при движении по одному из этих отрезков мы движемся в одну сторону, а при движении по другому — в другую. Если теперь взять действие при движении от $A$ до $C$ и рассматривать его как эффект движения в одном направлении, а действие при движении от $D$ к $B$ — как действие при движении от $B$ к $D$, но с другим знаком из-за противоположного направления движения, то мы увидим, что для обеспечения нужного равенства необходимо, чтобы действие при движении из $A$ в $C$ совпадало с действием при движении из $B$ в $D$. Но это — изменение действия при маленьком шаге из $B$ в $D$. Эта величина — изменение действия при маленьком шаге вправо — одна и та же и в начале (от $A$ к $C$) и в конце (от $B$ к $D$). Значит, у нас имеется величина, которая не меняется со временем, если только справедлив принцип минимума и выполняется принцип симметрии относительно пространственных переносов. Эта, не изменяющаяся во времени величина (изменения действия при малом шаге в том или ином направлении), оказывается в точности равной количеству движения, о котором говорилось в предыдущей лекции. Такова взаимосвязь между законами симметрии и законами сохранения, вытекающая из того, что законы подчиняются принципу наименьшего действия. А они подчиняются ему, как оказывается, потому, что вытекают из законов квантовой механики. Вот поэтому-то я и сказал, что в конечном счете связь между законами симметрии и законами сохранения объясняется законами квантовой механики.

Рассуждая точно так же относительно сдвигов во времени, мы приходим к закону сохранения энергии. Утверждение о том, что поворот в пространстве не меняет физических законов, оборачивается законом сохранения момента количества движения. Возможность же зеркального отображения не находит себе простого, с точки зрения классической физики, выражения. Физики называют это свойство четностью, а соответствующий закон сохранения — законом сохранения четности, но это лишь все запутывает. Я решил упомянуть о законе сохранения четности потому, что (возможно, вы читали об этом) этот закон оказался неверным. Произошло это потому, что оказался неверным принцип неразличимости правого и левого.

Раз уж я говорю о законах симметрии, мне хотелось бы сказать вам, что в связи с ними возникло несколько новых задач. Например, у каждой элементарной частицы

есть соответствующая ей античастица: для электрона это позитрон, для протона — антипротон. В принципе, мы могли бы создать так называемую антиматерию, в которой каждый атом был бы составлен из соответствующих античастиц. Так, обычный атом водорода состоит из одного протона и одного электрона. Если же взять один антипротон, электрический заряд которого отрицателен, и один позитрон и объединить их, то мы получим атом водорода особого типа, так сказать, атом антиводорода. Причем было установлено, что в принципе такой атом был бы ничуть не хуже обычного и что таким образом можно было бы создать антиматерию самого разного вида. Теперь позволительно спросить, а будет ли такая антиматерия вести себя точно так же, как наша материя? И, насколько нам это известно, ответ на этот вопрос должен быть положительным. Один из законов симметрии заключается в том, что если мы сделаем установку из антиматерии, то она станет вести себя точно так же, как и установка из нашей обычной материи. Правда, стоит свести эти установки в одном месте, как произойдет аннигиляция и только искры полетят.

Раньше считалось, что материя и антиматерия подчиняются одним и тем же законам. Теперь же, когда мы знаем, что симметрии левого и правого не существует, возникает важный вопрос. Если взять нейтронный распад, но с эмиссией античастиц, так что антинейтрон распадается на антипротон и антиэлектрон (по-другому, позитрон) и нейтрино, то будет ли он происходить как и раньше, т. е. будут ли позитроны вылетать, вращаясь в левую сторону, или все будет по-другому? Еще совсем недавно мы полагали, что все здесь будет наоборот, что позитроны (антиматерия) будут вылетать, вращаясь слева направо, а электроны (материя) — справа налево. В этом случае мы в действительности не смогли бы объяснить марсианину, что такое право и что такое лево. Ведь если бы вдруг оказалось, что он состоит из антиматерии, то он, поставив продиктованный ему опыт, наблюдал бы позитрон вместо электрона, а тот вращается в противоположную сторону, и марсианин решил бы, что сердце находится с другой стороны. Предположим, вы вышли на связь с марсианином и объяснили ему, как сделать человека. Он его сделал. Все в порядке, человек вышел на славу. Затем вы объясняете ему наши правила поведения. Наконец, вы строите хороший космический корабль и отправляетесь повидаться с искусственным человеком. Вы выходите ему навстречу,

протягиваете руку. Если в ответ он протягивает вам тоже правую руку,— прекрасно, но если левую,— берегитесь, как бы вам с ним не аннигилировать!

Мне хотелось бы рассказать вам еще о некоторых свойствах симметрии, но говорить о них гораздо труднее. Кроме того, в природе есть совершенно замечательные явления, связанные с так называемой слабой симметрией. Разве не замечательно, например, что отличить правое от левого мы можем лишь по очень слабому эффекту β-распада? Это значит, что на 99,99 % природе все равно, что левое, что правое,— и вдруг одно едва приметное явленьице выходит из ряда вон и оказывается совершенно однобоким.

## РАЗЛИЧИЕ ПРОШЛОГО И БУДУЩЕГО

Каждому ясно, что события, происходящие в нашем мире, явно необратимы. Другими словами, все происходит так, а не наоборот. Роняешь чашку, она разбивается, и сколько ни жди, черепки не соберутся снова и чашка не прыгнет обратно тебе в руки. А на берегу моря, где разбиваются волны, можно долго стоять и напрасно ждать того великого момента, когда пена соберется в волну, встанет над морем и покатится все дальше и дальше от берега — вот было бы зрелище!

На лекциях такие штуки обычно показывают при помощи кино: вырезают кусок кинопленки, на котором снята какая-то последовательность событий, и показывают его в обратном направлении, заранее рассчитывая на взрыв смеха. Этот смех свидетельствует о том, что в реальной жизни такого не бывает. Впрочем, на самом деле это довольно примитивный способ выражения столь очевидного и столь глубокого факта, как различие прошлого и будущего. Мы помним прошлое, но не помним будущего. Наша осведомленность о том, что может произойти, совсем другого рода, чем о том, что, вероятно, уже произошло. Прошлое и настоящее совсем по-разному воспринимаются психологически: для прошлого у нас есть такое реальное понятие, как память, а для будущего — понятие кажущейся свободы воли. Мы уверены, что каким-то образом можем влиять на будущее, но никто из нас, за исключением, быть может, одиночек, не думает, что можно изменить прошлое. Раскаяние, сожаление и надежда — это все слова, которые совершенно очевидным образом проводят грань между прошлым и будущим.

Но если все в этом мире сделано из атомов и мы тоже состоим из атомов и подчиняемся физическим законам, то наиболее естественно это очевидное различие между прошлым и будущим, эта необратимость всех явлений объяснялась бы тем, что у некоторых законов движения атомов только одно направление — что атомные законы

не одинаковы по отношению к прошлому и будущему. Где-то должен существовать принцип вроде: «Из елки можно сделать палку, а из палки не сделаешь елки», в связи с чем наш мир постоянно меняет свой характер с елочного на палочный,— и эта необратимость взаимодействий должна быть причиной необратимости всех явлений нашей жизни.

Однако такой принцип пока еще не найден. То есть во всех законах физики, обнаруженных до сих пор, не наблюдается никакого различия между прошлым и настоящим. Кинолента должна показывать одно и то же в обе стороны, и физик, который увидит ее, не имеет никаких оснований для смеха.

Обратимся еще раз к закону всемирного тяготения. Рассмотрим Солнце и планету, которая вращается вокруг Солнца в некотором направлении. Заснимем это движение на кинопленку, а затем покажем отснятый фильм задом наперед. Что же произойдет? Мы увидим, что планета вращается вокруг Солнца, правда, в обратном направлении, и траектория ее движения образует эллипс. Скорость движения планеты оказывается такой, что за равные промежутки времени радиус, соединяющий Солнце и планету, описывает всегда равные площади. В действительности все будет точно таким, каким это должно быть. Нам не удастся решить, в каком направлении нам показывают фильм — в прямом или обратном. Так что для закона всемирного тяготения безразлично направление времени; если вам показывают задом наперед любой фильм о событиях, связанных лишь с законами тяготения, то все, что вы увидите на экране, будет выглядеть совершенно естественным. Эту мысль можно выразить еще более точно. Если в какой-то сложной системе скорости всех частиц вдруг мгновенно изменят свои значения на обратные, то система вернется в исходное положение, пройдя в обратном порядке все те стадии, которые она уже прошла до внезапного изменения скоростей. Так что если имеется множество частиц, выполняющих какую-то работу, и мы мгновенно изменим их скорости на обратные, то частицы эти полностью исправят все то, что они успели к этому моменту сделать.

Это свойство заложено в самой формулировке закона всемирного тяготения, утверждающего, что под действием силы изменяется скорость. Если изменить направление времени, то силы не изменятся и, следовательно, на соответствующих промежутках времени не изменятся и

приращения скорости. Поэтому каждая скорость претерпит точно такие же изменения, как и раньше, только в обратной последовательности. Так что доказать обратимость во времени закона всемирного тяготения совсем не трудно.

Ну, а законы электричества и магнетизма? Они тоже обратимы во времени. Законы ядерной физики? Насколько мы знаем, обратимы. Законы β-распада, о которых мы уже говорили раньше, также обратимы? Наши трудности с экспериментами, проводившимися несколько месяцев тому назад и показавшими, что здесь не все так гладко, что какие-то законы нам еще не известны, заставляют думать, что на самом деле β-распад, может быть, и необратим во времени, и для того, чтобы окончательно убедиться в этом, нам понадобятся новые опыты *). Но так или иначе никто не сомневается в следующем: β-распад (обратим он во времени или нет) представляет собой явление третьестепенной важности для большинства повседневных ситуаций. То, что я могу говорить с вами, не зависит от β-распада, но зависит от химических взаимодействий, от наличия электрических сил, немного (пока что) от ядерных реакций, а также и от гравитационных явлений. Тем не менее все, что я делаю, определенно необратимо во времени: я говорю, и воздух разносит мой голос, а не засасывается обратно в рот, когда я его открываю, и эту необратимость невозможно оправдать одной необратимостью β-распада. Другими словами, можно считать, что почти все наиболее часто встречающиеся явления этого мира, возникающие в результате перемещений атомов, подчиняются законам, полностью обратимым во времени. Так что нам придется поискать какое-нибудь другое объяснение этой необратимости.

Если мы станем наблюдать за движением наших планет более пристально, мы вскоре заметим, что здесь не все так, как это нам казалось поначалу. Например, вращение Земли вокруг ее оси мало-помалу замедляется. Это происходит из-за приливного трения, а всякое трение, очевидно, необратимо. Если толкнуть какой-нибудь тяжелый предмет, лежащий на полу, он сдвинется с места и снова остановится. И сколько бы вы ни стояли и ни ждали, он не

---

*) Речь идет об открытии распада $K_2^0$-мезона на два π-мезона, явлении, противоречащем обратимости времени. См. книгу Гарднера «Этот правый, левый мир» (М.: Мир, 1967), где в дополнении рассказывается об этом открытии. (Отметим досадную опечатку — там в начале вместо распада на 2π написано о распаде на 3π.) — *Примеч. ред.*

сорвется с места и не вернется к вам. Так что все эффекты, связанные с трением, кажутся необратимыми. Но трение, как мы выяснили раньше, это результат необыкновенно сложного взаимодействия предмета и поверхности, результат колебаний атомов в месте контакта. Организованное движение тела преобразуется в неорганизованную беспорядочную суматоху атомов поверхности, по которой движется тело. Вот почему нам стоит получше разобраться в этих процессах.

Именно здесь-то мы и найдем разгадку наблюдаемой необратимости явлений. Рассмотрим один простой пример. Пусть у нас есть вода, подсиненная чернилами, и обычная вода, без чернил, и пусть они налиты в банку из двух половин, разделенных очень тонкой перегородкой. Осторожно вытащим перегородку. В самом начале вода разделена: синяя справа, чистая слева. Но погодите. Мало-помалу синяя вода начинает перемешиваться с обычной, и через некоторое время вся вода оказывается голубой, причем интенсивность синего цвета уменьшится наполовину. Это значит, что чернила равномерно распределились по всему объему. Теперь, сколько бы мы ни ждали, наблюдая воду, мы не дождемся, чтобы она разделилась на синюю и обычную. (Конечно, вы можете *заставить* ее разделиться. Можно, например, выпарить воду и сконденсировать пары где-то в другом месте, собрать синюю краску, растворить ее в половине собранной воды, закрыть заслонку и налить воду обратно в банку, разделенную на две половины. Но когда вы будете делать все это, вы непременно вызовете другие необратимые процессы.) Сама по себе вода не вернется в начальное состояние.

Это дает нам определенный ключ к решению задачи. Давайте посмотрим на поведение молекул. Предположим, что мы сняли фильм о перемешивании чистой воды с синей. Теперь если показать его в обратном направлении, то это будет выглядеть очень странно. Сначала будет равномерно окрашенная вода, а потом постепенно начнется разделение — совершенно очевидно, что такое кино выглядит не слишком правдоподобно. Увеличим теперь наши снимки таким образом, чтобы физики смогли наблюдать за каждым атомом и попытаться найти, что же там происходит необратимым образом, где нарушаются законы равновесия между движением в будущее и движением в прошлое. Включаем киноаппарат и смотрим на экран. Мы видим атомы двух различных сортов (конечно, это нелепо, но будем называть их синими и белыми), постоянно мечущиеся из сто-

роны в сторону из-за теплового движения. Если мы начнем наши наблюдения с самого начала, то окажется, что большинство атомов одного типа расположились по одну сторону, а большинство атомов другого типа — по другую. Но эти атомы непрерывно мечутся из стороны в сторону, и их миллиарды и миллиарды, и даже если вначале все синие атомы были с одной стороны, а все белые — с другой, мы увидим, что во время своих бесконечных хаотических метаний они начнут перемешиваться, и этим-то и объясняется, почему в конце концов вода оказывается более или менее равномерно голубой.

Давайте понаблюдаем за любым из столкновений, происходящих в нашем кинофильме. Мы увидим, что атомы сначала сталкиваются, а затем разлетаются в обратном направлении. Покажем затем соответствующий отрывок кинофильма задом наперед. Мы увидим, как пара молекул сходится по траекториям, по которым они на самом деле разлетались, а затем, столкнувшись, разлетаются по траекториям, по которым они сходились. Физик, пристально наблюдавший за всем происходящим, заверит вас: «Здесь все правильно, все согласуется с законами физики. Если молекулы сходились по этим траекториям, то они должны разлетаться так, как они разлетелись». Так что это явление обратимо. Законы молекулярных столкновений обратимы во времени.

Итак, если мы станем наблюдать слишком пристально, мы снова ничего не сможем понять. Ведь каждое из столкновений полностью обратимо, а все же наш кинофильм, прокрученный в обратном направлении, показывает нечто совершенно абсурдное: как молекулы, поначалу смешанные (синие, белые, синие, белые), с течением времени после множества столкновений разделились на белые, сосредоточенные в одном месте, и синие, расположенные в другом. Но ведь этого не может быть, это неестественно, чтобы синее само по себе случайно отделялось от белого. И в то же время, если наблюдать нашу прокручиваемую задом наперед картину, каждое столкновение абсолютно законно.

Единственный вывод, к которому здесь можно прийти, заключается в том, что данная необратимость как раз и вызвана всеми этими случайностями. Если вы начнете с состояния, в котором все разделено, и станете производить всякие случайные изменения, то распределение будет все более и более равномерным. Но если начать с равномерного распределения и снова заняться случайными изменениями, то мы не придем к разделению. В принципе,

разделение *может* наступить. Законам физики не будет противоречить такое движение и такие отражения молекул, при которых они разделятся. Просто это очень маловероятно. Так может произойти раз в миллион лет. В этом и заключается ответ на наш вопрос. События нашего мира необратимы в том смысле, что их развитие в одну сторону весьма вероятно, а в другую — хотя и возможно, хотя и не противоречит законам физики, но случается один раз в миллион лет. Поэтому просто нелепо сидеть и ждать, что когда-то хаотическое движение атомов приведет к разделению равномерной смеси чернил и воды на чернила по одну сторону резервуара и воду — по другую.

Теперь выделим из нашего эксперимента очень маленький объем, так что в новый резервуар попадет всего по четыре-пять молекул каждого типа, и станем наблюдать за тем, как они перемешиваются. Мне кажется, нетрудно поверить в то, что когда-то, и совсем необязательно через миллион лет, может быть, и в течение года, в процессе бесконечных хаотических столкновений этих молекул окажется, что они вернулись в состояние, более или менее похожее на исходное. По крайней мере, если в этот момент захлопнуть заслонку, все белые молекулы окажутся в правой половине резервуара, а все синие — в левой. В этом нет ничего невозможного. Но реальные объекты, с которыми мы имеем дело, состоят не из четырех или пяти белых и синих молекул. В них четыре или пять миллионов миллионов миллионов миллионов молекул, и нужно, чтобы все они разделились таким образом. Поэтому кажущаяся необратимость природы не следует из необратимости основных законов физики. Она связана с тем, что если вы начинаете с некоторой упорядоченной системы и подвергаете ее случайностям, происходящим в природе, столкновению молекул например, то все происходит необратимым образом, только в одну сторону.

В связи с этим возникает следующий вопрос: а чем объяснить существование исходного порядка? Другими словами, почему удается начать с упорядоченной системы? Трудность здесь заключается в том, что мы начинаем всегда с упорядоченного состояния, но никогда не приходим к такому же состоянию. Один из законов природы состоит в том, что все меняется от порядка к беспорядочности. В этом случае слово «порядок», так же как слово «беспорядок», является еще одним примером того, как повседневные слова меняют свой обыденный смысл, когда ими начинают пользоваться физики. Порядок в физическом

смысле вовсе не должен быть полезным для нас, людей; это слово просто указывает на существование какой-то определенности. Все атомы одного типа расположены с одной стороны, а все атомы другого типа — с другой, или все они перемешаны,— вот и вся разница между порядком и беспорядком в физике.

Таким образом, вопрос состоит в том, как же достигается первоначальный порядок и почему, когда мы смотрим на любую обычную ситуацию, которая упорядочена только частично, мы можем заключить, что, вероятнее всего, она возникла из другой, еще более упорядоченной. Если я смотрю на резервуар с водой, которая с одной стороны темно-синяя, с другой — бледно-голубая, а посредине — промежуточного синего цвета, и я знаю, что в течение последних 20 или 30 мин к этому резервуару никто не прикасался, я легко догадаюсь — такая расцветка возникла потому, что раньше разделение было гораздо более полным. Если подождать еще, то прозрачная и синяя вода перемешаются еще больше, и если я знаю, что в течение достаточно долгого времени с ней ничего не делали, то смогу сделать некоторые заключения о ее первоначальном состоянии. Тот факт, что по краям цвет воды «ровный», указывает на то, что в прошлом эти цвета были разделены гораздо резче. В противном случае за прошедшее время они перемешались бы в гораздо большей степени. Таким образом, наблюдая настоящее, мы можем узнать кое-что о прошлом.

На самом деле физиков это обычно не очень интересует. Физики склонны считать важными и серьезными задачи только такого типа: сейчас условия таковы; что будет дальше? Остальные родственные нам науки занимаются совсем другими задачами. Да и вообще все другие области знания — история, геология, астрономия — решают задачи совсем другого рода. Оказывается, они умеют делать предсказания совсем другого типа, чем те, к которым привыкли физики. Физик обычно говорит: «При таких-то условиях я могу сказать вам, что сейчас произойдет». А геолог скажет вам что-нибудь в таком роде: «Я выкопал из земли кости определенного типа. Поэтому я предсказываю, что если покопать еще, то можно будет найти и другие кости того же типа». Историк, хотя и говорит о прошлом, может при этом говорить о будущем. Когда он утверждает, что Французская революция произошла в 1789 г., он хочет сказать, что, если вы заглянете в другую книгу о Французской революции, вы найдете в ней ту же дату. В дей-

ствительности он делает предсказание особого рода о чем-то, чего он еще никогда не видел, о документах, которые еще нужно найти. Он утверждает, что в этих документах, если речь в них идет о Наполеоне, окажется то же, что написано в других документах. Возникает вопрос, почему это возможно, и единственный выход — предположить, что в этом смысле прошлое нашего мира более организовано, чем его настоящее.

Некоторые полагают, что наш мир стал упорядоченным следующим образом. Сначала вся наша Вселенная находилась в состоянии абсолютно неупорядоченного движения, совсем как полностью перемешанная вода. Но мы видим, что если ждать достаточно долго и если число атомов очень невелико, то чисто случайным образом в один из моментов времени вода оказывается разделенной. Некоторые физики (в прошлом веке) высказали предположение, что с нашей Вселенной случилось лишь вот что: в нашем мире, где беспорядочное движение все шло и шло своим чередом, произошла флуктуация. (Именно этим термином пользуются каждый раз, когда наблюдается некоторое отклонение от обычной равномерности.) Итак, произошла флуктуация, а теперь мы наблюдаем, как все потихоньку возвращается к хаосу. Вы можете возразить мне: «Послушайте, сколько же времени надо ждать, чтобы дождаться такой флуктуации». Знаю, знаю, но если бы флуктуация не была достаточно сильной для того, чтобы начались процессы эволюции, чтобы возникли разумные существа, никто бы ее и не заметил. Так что нам ничего и не оставалось, как ждать и ждать до тех пор, пока мы не появимся на свет и не заметим ее,— на это понадобилась флуктуация хотя бы такой силы. Правда, лично мне такая теория кажется неверной. Она мне кажется нелепой, и вот по каким причинам.

Предположим, что наш мир очень большой, что в первоначальном состоянии атомы были хаотически разбросаны по всему миру и что я могу наблюдать за любой его частью, выбирая ее совершенно случайным образом. Тогда если вдруг окажется, что атомы наблюдаемой мною части каким-то образом упорядочены, у меня не будет никаких оснований предполагать аналогичную упорядоченность атомов в других участках нашего мира. В самом деле, если здесь, у нас, произошла флуктуация и мы видим здесь что-то необычное, то, вероятнее всего, она появилась здесь за счет того, что в другом месте не стало ничего необычного. Другими словами, для того чтобы добиться

отклонения от нормы в одном месте, необходимо, так сказать, призанять со стороны, ио занимать нужно не очень много. В нашем опыте с подкрашенной и чистой водой в тот момент, когда наши несколько молекул вдруг разделятся, вся остальная вода, вероятнее всего, будет перемешана. А поэтому, хотя каждый раз, когда мы смотрим на звезды и на мир в целом, мы замечаем, что все упорядочено, мы должны были бы считать, что коль скоро это — флуктуация, то дальше, куда мы еще не заглядывали, все должно быть в беспорядке и состоянии полного хаоса. Хотя разделение материи на горячие звезды и холодный космос, которое мы наблюдаем, и может быть результатом некоторой флуктуации, в других местах, которые мы не можем наблюдать сегодня, мы не имели бы никаких оснований ожидать разделения на звезды и космос. Тем не менее мы всегда предсказываем, что вне пределов нашей досягаемости находятся звезды такого же типа, или что там можно найти те же самые утверждения о Наполеоне, или заметить кости, которые мы уже видели раньше. Успех всех таких научных предсказаний свидетельствует о том, что наш мир не появился на свет в результате флуктуации, а, наоборот, развился из другого, более организованного. Поэтому мне кажется необходимым добавить к известным физическим законам гипотезу о том, что в прошлом Вселенная была более упорядоченной (в физическом смысле этого слова), чем сегодня. Я думаю, именно этого дополнительного утверждения нам не хватает для того, чтобы поставить все на свои места, чтобы до конца разобраться в явлениях необратимости.

Конечно, это утверждение несимметрично относительно времени само по себе: ведь из него следует, что прошлое чем-то отличается от будущего. Но оно выходит за рамки того, что принято обычно считать физическими законами, так как мы сегодня стараемся проводить резкую грань между законами физики, управляющими развитием Вселенной, и высказываниями о том, в каком состоянии находился наш мир в прошлом. Последние относят к астрономической истории, хотя вполне может быть, что в один прекрасный день она и станет разделом физики.

О необратимости можно рассказать еще много интересного, и я обращусь к конкретному примеру. Любопытно, например, посмотреть, как на самом деле работает какой-нибудь необратимый механизм.

Представьте себе, что мы сделали какое-то устройство, которое, как нам известно, может работать лишь в одном

направлении. Я, например, хочу сделать храповое колесо, т. е. зубчатое колесо, у которого ведущая кромка всех зубцов обрывается очень круто, а задняя полого сходит на нет. Колесо насажено на вал, и к нему пружиной (рис. 28) прижимается маленькая защелка (собачка), сидящая на своей собственной оси.

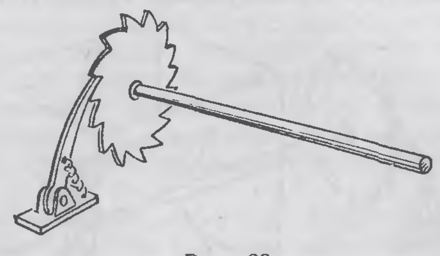


Рис. 28

Такое колесо может крутиться лишь в одну сторону. Если попытаться повернуть его обратно, собачка упрется в прямой срез зубца и не пустит его. При повороте же колеса в прямом направлении она с треском перескакивает с зубца на зубец — трак, трак, трак, ... (Вы знаете, о чем я говорю. Такие храповики используются в часах, в том числе и в наручных. При заводе часов они позволяют вам закручивать пружину и не дают ей потом раскручиваться.) Такой механизм полностью необратим в том смысле, что колесо не может вращаться в обратную сторону.

Так вот, предполагалось, что при помощи такого необратимого механизма, колеса, которое способно поворачиваться лишь в одну сторону, можно сделать одно очень полезное и интересное устройство. Как вам уже известно, в природе непрерывно происходит вечное хаотическое движение молекул, и если построить какой-нибудь очень чувствительный прибор, его стрелка будет постоянно дрожать, так как она все время находится под хаотическим обстрелом соседних молекул воздуха. Давайте же воспользуемся этим и посадим на вал нашего механизма четыре лопасти, как это показано на рис. 29. Лопасти находятся в сосуде с газом и непрерывно и хаотически обстреливаются его молекулами, толкающими лопасти то в одну, то в другую сторону. Но когда лопасти пытаются повернуться в одну сторону, им не дает это сделать собачка, а когда они пытаются повернуться в другую, этому ничто не мешает, так что наше колесо будет постоянно вращаться,

и у нас получится что-то вроде вечного двигателя. И все потому, что движение храповика необратимо.

Но во всем этом нужно получше разобраться. В действительности механизм работает следующим образом. Когда колесо поворачивается в одну сторону, оно приподнимает собачку, которая затем срывается с зубца и защелкивается, ударяясь о следующий зубец. Затем собачка

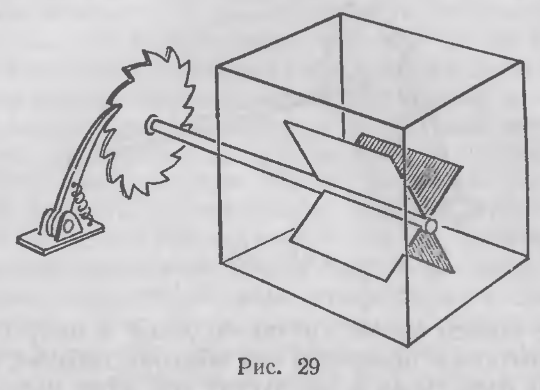


Рис. 29

отскакивает, и, если она абсолютно упруга, она будет все время отскакивать и отскакивать, и так без конца, а колесо сможет вращаться как вперед, так и назад (когда собачка случайно подскочит вверх), так что наш механизм не станет работать, если только, защелкиваясь, собачка не будет залипать, останавливаться или отскакивать не до самого верха. Если она отскакивает, но не до самого верха, то это значит, что где-то здесь есть так называемое демпфирование, или трение, а значит, срываясь с зубца, отскакивая и останавливаясь (а только так собачка может обеспечить необратимость работы нашего механизма), она будет выделять тепло из-за трения, так что колесо будет все горячее и горячее. Но когда оно достаточно разогреется, начнутся другие явления. Так же как и в газе, окружающем лопасти, молекулы собачки и колеса находятся в постоянном броуновском, хаотическом движении, поэтому неважно, из чего сделано колесо и собачка, а также другие детали. Чем выше их температура, тем более хаотическим становится их движение. Наконец наступает такой момент, когда колесо разогрелось настолько, что собачка просто прыгает вверх и вниз из-за движения своих собственных молекул, т. е., в сущности, в силу тех же причин, которые заставляют вращаться лопасти. Но, под-

скакивая вверх и вниз на колесе, собачка остается наверху столько же времени, сколько и внизу, так что колесо может поворачиваться в обе стороны. Вот и нет у нас больше механизма с односторонним движением. Храповик может даже начать вращаться в обратную сторону! Если само колесо разогрелось, а та часть механизма, где насажены лопасти, холодная, то колесо, которое по вашим расчетам всегда должно вращаться в одну сторону, станет вращаться в обратном направлении, поскольку каждый раз собачка, срываясь, будет падать на наклонную кромку зубца и, следовательно, будет толкать его назад. В следующий раз она снова подпрыгнет, упадет еще раз на наклонную кромку следующего зубца и вновь толкнет его в обратном направлении.

А причем тут температура газа вокруг лопастей? Предположим, что лопастей в нашем механизме нет вообще. Тогда, если собачка падает на наклонный срез зубца и толкает колесо вперед, немедленно после этого происходит следующее: на собачку налетает крутой передний срез следующего зубца, он отскакивает и поворачивает колесо назад. Вот для того, чтобы колесо не отскакивало назад, мы надели на него демпфер и поместили лопасти в воздух, который не позволяет колесу отскакивать без помех и замедляет его движение. Итак, наше колесо будет-таки вращаться в одну сторону, только не в ту, в какую предполагалось. Оказывается, что, как вы его ни сделаете, такой механизм будет вращаться в одну сторону, если одна его часть горячее другой, и в другую — если она холоднее. Но, после того как между отдельными частями произойдет теплообмен и все успокоится, так что и температура колеса, и температура лопастей окажутся одинаковыми, он не станет вращаться ни в одну, ни в другую сторону, в среднем конечно. Вот вам пример из техники, когда явление природы протекает только в одну сторону до тех пор, пока нарушено равновесие, пока с одной стороны спокойнее, чем с другой, пока одна сторона «синее» другой.

Казалось бы, из закона сохранения энергии должно следовать, что в нашем распоряжении неисчерпаемые запасы энергии. Ведь природа никогда не теряет энергию, как и не приобретает ее. Но энергия, скажем, моря, энергия теплового движения его атомов, для нас практически недоступна. Для того чтобы эту энергию организовать, направить, извлечь для последующего использования, необходимо создать разницу температур. В противном

случае мы увидим; что хотя энергия и есть, использовать ее не удается. Так что между наличием энергии и ее доступностью огромная дистанция.

Согласно закону сохранения энергии суммарная энергия Вселенной постоянна. Но при хаотическом движении она может быть распределена настолько равномерно, что в некоторых случаях нельзя ничего добиться ни в одном направлении, ни в другом: энергией уже невозможно больше управлять.

Мне кажется, что вам будет яснее, если я проведу следующую аналогию. Не знаю, приходилось ли вам (мне приходилось) сидеть на пляже с несколькими полотенцами, когда вдруг неожиданно начинается ливень. Как можно проворнее вы хватаете свои полотенца и кидаетесь в раздевалку. Там вы начинаете вытираться и оказывается, что ваши полотенца немного намокли, но все же суше вашего тела. Вы вытираетесь одним полотенцем до тех пор, пока оно не совсем промокло (тогда оно ровно столько же мочит вас, сколько и вытирает), берете другое — и довольно скоро открываете ужасную истину: все полотенца мокрые, а вы еще не вытерлись до конца. Теперь вытереться совсем невозможно, хотя у вас и много полотенец, а все потому, что в некотором смысле между вашей собственной влажностью и влажностью полотенец нет никакой разницы. Можно придумать какую-нибудь величину, которую мы назовем «водоудаляющей способностью». Так вот, «водоудаляющая способность» полотенца равна вашей собственной «водоудаляющей способности», и, вытираясь мокрым полотенцем, вы забираете им такое же количество воды, какое забирает ваша кожа из полотенца. Это не значит, что на вас и в полотенце соберется одинаковое количество воды. Если полотенце большое, воды в нем будет больше, если маленькое — меньше, но их влажность будет одинаковой. После того как влажность всех предметов сравнялась, с этим уже ничего нельзя поделать.

В этом примере вода, как энергия, ведь общее количество воды не меняется. (Конечно, если дверь раздевалки открыта и можно выскочить на солнышко и просохнуть или раздобыть еще одно сухое полотенце, мы спасены. Но представьте себе, что дверь закрыта, других полотенец нет, а от этих вам никуда не деться.) Так вот, если представить себе изолированную часть Вселенной и подождать достаточно долго, то из-за происходящих в этом мире случайностей энергия, как и вода, распределится по всей этой части равномерно, и от необратимости явлений не останется

и следа. В этом мире никогда уже не произойдет ничего интересного в том смысле, как мы это понимаем.

Поэтому в ограниченной системе, содержащей храповик, собачку и вертушку и ничего более, температура постепенно выравнивается и колесо перестает вращаться как в одну, так и в другую сторону. Точно так же, если надолго оставить любую систему в покое, в ней произойдет всесторонний обмен энергией и в конце концов не останется энергии для каких-либо процессов.

Между прочим, параметр, соответствующий в нашем примере влажности, или «водоудаляющей способности», называют температурой, и хотя я и могу сказать, что если температура двух объектов одинакова, то они находятся в равновесии, это не значит, что энергия обоих объектов одинакова. Это означает лишь то, что извлечь энергию из одного и из другого объекта одинаково легко. Температура очень похожа на «водоудаляющую способность». Поэтому, если поместить наши два объекта рядом друг с другом, внешне ничего не произойдет. Они просто будут обмениваться энергией в равных количествах, так что суммарный результат обмена окажется равным нулю. Поэтому каждый раз, когда температура всех объектов оказывается одинаковой, в системе не остается энергии на какие-нибудь внутренние преобразования. Принцип необратимости же заключается в том, что если в системе есть разница температур и система предоставлена сама себе, то с течением времени температура все более и более выравнивается, а количество свободной энергии неуклонно падает.

По-другому этот принцип называют законом возрастания энтропии, согласно которому энтропия может лишь возрастать. Но суть не в названиях, смысл его в том, что свободная пригодная для использования энергия может только уменьшаться. И это характерное свойство нашего мира в том смысле, что оно вытекает из хаотичности движения молекул. Если в предоставленной самой себе системе температура не всюду одинакова, то постепенно происходит выравнивание температуры. Если же и там и тут температура одинакова, как, например, температура воды на обычной нерастопленной печке, нечего и думать, что вода сама по себе замерзнет, а печка сама по себе затопится. Но если печь горячая, а вместо воды — лед, все происходит само по себе, только наоборот. Таким образом, необратимость всегда приводит к уменьшению запаса свободной энергии.

Вот и все, что я хотел сказать на эту тему. Мне хочется сделать лишь несколько дополнительных замечаний. Мы

только что познакомились с одним очевидным эффектом (необратимости), который не является очевидным следствием законов физики и даже не связан с ними непосредственно. Для того чтобы его можно было объяснить, требуются долгие и довольно тонкие рассуждения. А ведь этот эффект играет первостепенную роль в энергетической экономике Вселенной, во всех наблюдаемых явлениях этого мира, во всех очевидных вещах. Наша память, черты нашего характера, различие между прошлым и будущим самым непосредственным образом связаны с этим эффектом, и в то же время он не является прямым следствием основных законов. Для того чтобы прийти к нему, нужен долгий анализ.

Законы физики нередко не имеют очевидного прямого отношения к нашему опыту, а представляют собой его более или менее абстрактное выражение. Примером этому может служить тот факт, что законы обратимы, а явления — нет.

Очень часто между элементарными законами и основными аспектами реальных явлений дистанция огромного размера. Например, когда вы смотрите на ледник с большого расстояния и видите, как в море падают громадные глыбы, как движется лед и т. п., не так уж важно помнить, что ледник состоит из маленьких шестиугольных кристалликов льда. Однако если разобраться в движении ледников достаточно глубоко, окажется, что оно действительно в значительной степени предопределяется характером кристаллов льда. Но для того чтобы разобраться в законах движения ледников, нужно немало времени (да сейчас и нет таких людей, которые достаточно хорошо разбирались бы в свойствах льда, хотя на изучение его потрачено немало времени). Тем не менее можно надеяться, что если мы разберемся в свойствах кристаллов льда, мы в конце концов осилим и законы движения ледников.

Правда, хотя в этих лекциях мы говорили о фундаментальных законах физики, я должен сразу предупредить вас, что одного знания этих основных законов в том виде, в каком они известны нам сегодня, еще недостаточно для того, чтобы сразу начать разбираться в сколько-нибудь сложных явлениях. На это требуется время, да и потом нам удается разобраться в более сложных явлениях лишь частично. Природа устроена таким образом, что самые ее важные факты оказываются отдаленными следствиями более или менее случайного сочетания множества законов.

Например, ядра, содержащие несколько элементарных частиц — протонов и нейтронов, представляют собой чрез-

вычайно сложные системы. У них есть так называемые энергетические уровни, они могут находиться в различных состояниях или условиях, характеризуемых уровнем энергии, и эти уровни различны для разных ядер. Математическая задача определения значений различных энергетических уровней очень сложна, и мы умеем решать ее лишь частично. Точное положение уровней, очевидно, является следствием невероятно сложных процессов, а поэтому нет ничего особенно загадочного в том, что у азота с его пятнадцатью элементарными частицами в ядре одному уровню соответствует энергия 2,4 МэВ, другому — 7,1 МэВ и т. д. Но что, действительно, замечательно, так это то, что весь характер нашей Вселенной в значительной степени зависит от точного значения одного энергетического уровня одного ядра. Как оказывается, один уровень ядра $^{12}C$ равен 7,82 МэВ. И именно это делает нашу Вселенную такой, какая она есть.

Дело здесь вот в чем. Если начинать с водорода, а, по-видимому, сначала практически вся Вселенная состояла из водорода, то по мере сближения атомов водорода под действием сил притяжения и по мере повышения температуры водорода возникают условия для ядерных реакций, в результате которых может получиться гелий. Затем гелий может частично вступить в реакцию с водородом и образовать несколько новых, более тяжелых элементов. Но новые элементы немедленно распадутся вновь на гелий и водород. В связи с этим некоторое время ученые никак не могли понять, откуда же взялись остальные элементы нашей Вселенной. Ведь если начать плясать от водорода, то процессы превращения, протекающие в звездах, не могут дать что-нибудь иное, кроме гелия и пяти-шести других элементов. Столкнувшись с этой проблемой Хойл и Солпитер *) увидели здесь только один выход — если в результате соединения трех атомов гелия может образоваться атом углерода. Нетрудно подсчитать, насколько часто возникает такая возможность в звездах. И представьте себе, получилось, что такая вероятность вообще равна нулю, если только у углерода случайно не окажется энергетического уровня, равного 7,82 МэВ. Если же такой уровень есть, то три атома гелия, соединившись в атом углерода, начнут снова распадаться в среднем немного позже, чем при отсутствии у углерода энергетического уровня в 7,82 МэВ. И тогда этого

*) Фрэд Хойл — английский астроном из Кембриджского университета. Эдвин Солпитер — американский физик-теоретик и астрофизик из Корнеллского университета.

времени хватает для других преобразований, для образования новых элементов. Так что если бы у углерода оказался энергетический уровень, равный 7,82 МэВ, то мы могли бы понять, откуда взялись все элементы периодической таблицы. Вот путем такого обратного рассуждения, рассуждения от противного, было предсказано, что у углерода должен быть уровень, равный 7,82 МэВ. А лабораторный эксперимент подтвердил, что это действительно так. Поэтому существование в нашем мире всех других элементов очень тесно связано с тем обстоятельством, что у углерода оказалось именно это значение энергетического уровня. Но точное значение энергетического уровня углерода кажется нам, знающим законы физики, случайным результатом очень сложного взаимодействия 12 сложных частиц. Поэтому пример углерода может служить прекрасной иллюстрацией того факта, что понимание физических законов еще не обязательно гарантирует вам непосредственное понимание важнейших явлений нашего мира. Подробности реального существования очень часто весьма далеки от основных законов.

Мы можем анализировать явления нашего мира, выделяя в нем разные уровни, устанавливая некоторую иерархию понятий и представлений. Это — метод анализа. Я не собираюсь точно определять разные уровни, но попытаюсь лишь пояснить на примерах, что я имею в виду, когда говорю об иерархии понятий и представлений.

Скажем, на одном конце нашей иерархической лестницы мы расположим основные законы физики. Затем мы придумываем новые термины для некоторых близких понятий, которые, как нам это кажется, можно в конце концов объяснить на базе основных законов. Например, термин «теплота». Теплота, как предполагают, это результат хаотического движения атомов, и когда мы называем что-нибудь горячим, просто подразумеваем, что имеется некоторая масса атомов в состоянии интенсивного хаотического движения. Но сплошь и рядом, обсуждая тепловые свойства, мы забываем о хаотическом движении молекул — точно так же, как, говоря о леднике, мы не обязаны думать о шестиугольных кристаллах льда и снежинках, которые падали когда-то раньше. Другой пример того же рода, это пример с кристаллом соли. Если смотреть в самый корень, то это система огромного числа протонов, нейтронов и электронов. Но мы обходимся одним понятием «кристалл соли», который несет в себе целый образ совокупности элементарных взаимодействий. Точно такому же кругу идей принадлежит и понятие давления.

Теперь, если сделать по нашей лестнице еще один шаг вверх и перейти на следующий уровень, мы столкнемся со свойствами веществ, которые характеризуются, например, «коэффициентом преломления», определяющим, насколько отклоняется луч света, проходя через вещество, или «коэффициентом поверхностного натяжения», объясняющим, почему вода имеет тенденцию оставаться в виде единого целого, причем и то и другое описывается определенными числами. Напомню — теперь для того, чтобы выяснить, что в конце концов все это сводится к взаимодействию атомов и т. п., нам пришлось бы спуститься на несколько ступеней вниз, пройдя через ряд все менее сложных законов. Тем не менее мы свободно рассуждаем о «поверхностном натяжении» и при этом нас не интересует его внутренний механизм.

Продолжим наше восхождение по иерархической лестнице. От воды можно перейти к волнам, а затем уже и к понятию «шторм», причем слово «шторм» охватывает невероятное число различных явлений. К тому же классу принадлежат и другие собирательные понятия: «солнечное пятно» или «звезда». И очень часто нет никакого смысла докапываться до исходных механизмов всех составляющих явлений. По правде говоря, это и невозможно сделать, так как чем выше мы поднимаемся по нашей иерархической лестнице, тем больше ступеней отделяет нас от основных законов, а каждая из этих ступеней не очень надежна. Мы еще не продумали все с самого начала и до самого конца.

Продолжая подъем по иерархической лестнице сложности, мы добираемся до таких вещей, как «сокращение мускулов» или «нервные импульсы» — невероятно сложные явления физического мира, связанные с исключительно сложной организацией материи. А затем мы доходим и до таких понятий, как «лягушка».

Все дальше и дальше, и вот уже перед нами понятия «человек», «история», «политическая целесообразность» и другие понятия, которыми мы пользуемся для того, чтобы разбираться в событиях на еще более высоком уровне.

А затем наступает черед таким вещам, как «зло» и «красота», и «надежда»...

Какой же конец этой лестницы ближе к богу, если мне позволена будет религиозная метафора? Красота и надежда — или основные законы? Мне, конечно, кажется, что для нас важнее всего понять внутреннее структурное единство мира; что все науки, да и не только науки, любые интеллектуальные усилия направлены на понимание взаимосвязей между явлениями, стоящими на разных ступенях

нашей иерархической лестницы, на то, чтобы найти связь между красотой и историей, историей и человеческой психологией, психологией и механизмом мозга, мозгом и нервными импульсами, нервными импульсами и химией и так далее, как вверх, так и вниз. Сегодня мы еще не можем (и что толку притворяться будто это не так) провести непрерывную линию от одного конца до другого, ибо мы лишь вчера увидели существование такой иерархии.

И мне не кажется, что вопрос правильно поставлен. Выбрать один из этих концов и, отталкиваясь отсюда, надеяться достичь полного понимания, было бы ошибкой. Ни понимание природы зла, добра и надежды, ни понимание основных законов в отдельности не могут обеспечить глубокого понимания мира. Поэтому неразумно, когда те, кто изучает мир на одном конце иерархической лестницы, без должного уважения относятся к тем, кто делает это на другом конце. (На самом деле этого и нет, но люди уверяют нас, что именно так обстоит дело.) Вся огромная армия исследователей, работающих на всех ступенях нашей лестницы от одного края до другого, постоянно совершенствует наше понимание мира, и мы постепенно постигаем все колоссальное переплетение иерархий.

# ВЕРОЯТНОСТЬ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ — КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА ПРИРОДУ

На первых шагах истории экспериментальных исследований или каких-нибудь других исследований, преследующих научные цели, разумные объяснения наблюдаемых явлений основывались на интуиции, которая сама базируется на простейшем опыте соприкосновения с обыденными объектами. Но по мере того как мы пытаемся расширить наши представления и добиться лучшего соответствия между нашими объяснениями и тем, что мы наблюдаем, по мере того как наше объяснение становится все более и более широким и нас начинает интересовать все более широкий круг явлений, то, что еще совсем недавно было простым наблюдением, становится физическим законом. При этом с ним происходит странная вещь: часто он становится все более и более внешне нелогичным и все дальше и дальше расходится с тем, что подсказывает интуиция. Приведем лишь один пример. В теории относительности утверждается, что если вы считаете, что два события произошли одновременно, то это всего лишь ваша личная точка зрения, а кто-то другой с тем же основанием может утверждать, что одно из этих явлений произошло раньше другого, так что понятие одновременности оказывается чисто субъективным.

Конечно, иначе и быть не может, поскольку в нашей повседневной жизни мы имеем дело с огромными скоплениями частиц, очень медленными процессами и другими очень специфичными условиями, так что наш опыт дает нам лишь очень ограниченное представление о природе. Из непосредственного опыта можно почерпнуть сведения лишь об очень малой доле естественных явлений. И только при помощи очень тонких измерений и тщательно подготовленных опытов можно добиться более широкого взгляда на вещи. А тогда мы начинаем сталкиваться с неожиданностями. Мы наблюдаем совсем не то, что мы могли бы предположить, совсем не то, что мы себе представляли. Нам приходится сильнее напрягать свое воображение не для того, чтобы, как в худо-

жественной литературе, представить себе то, чего нет на самом деле, а для того, чтобы постичь то, что действительно *происходит*. Вот об этом-то я и хочу поговорить сегодня.

Начнем с истории изучения света. Сначала предполагалось, что свет очень похож на дождь из частиц, или корпускул, летящих как пули, выпущенные из ружья. Однако последующие исследования показали, что такое представление неверно и на самом деле свет ведет себя как волны, например как морские волны. Затем уже в XX веке, после дополнительных исследований, вновь стало казаться, что в очень многих случаях свет ведет себя как поток частиц. Наблюдая фотоэлектрический эффект, можно подсчитать число этих корпускул, теперь их называют фотонами. Когда электроны были только что открыты, казалось, что они ведут себя точно так же, как частицы (или пули). Проще простого. Но дальнейшие опыты, например с электронной дифракцией, показали, что они ведут себя как волны. И чем дальше шло время, тем более и более неясным становилось, как же они ведут себя — как корпускулы или как волны. Все выглядело то так, то этак.

Все нараставшая путаница была разрешена в 1925—1926 гг. открытием точных уравнений квантовой механики. Теперь мы знаем, как ведут себя электроны или свет. Но как я могу назвать такой характер поведения? Сказать, что они ведут себя как частицы, значило бы создавать у вас неправильное представление. То же самое получится, если я скажу, что они ведут себя как волны. Они ведут себя таким образом, что это ни в коей степени не напоминает чего-нибудь, с чем вы сталкивались раньше. Ваш опыт, основанный на том, с чем вы сталкивались раньше, неполон. Просто-напросто все то, что происходит в очень маленьком масштабе, происходит совсем по-другому. Атом не подчиняется тем же законам, что и грузик, подвешенный на пружине и колеблющийся на ней. Его нельзя также рассматривать как миниатюрную Солнечную систему с крошечными планетами, вращающимися по орбитам. Нельзя его представить и в виде какого-то облака или тумана, окутывающего ядро. Просто он не похож на все, что вы видели до этого.

Правда, здесь есть по крайней мере одно обстоятельство, облегчающее наше положение. Электроны ведут себя в указанном отношении точно так же, как и фотоны. И те и другие ведут себя необычным образом, но зато одинаково.

В связи со всем этим, для того чтобы понять, как они ведут себя, потребуется немалая доля творческой фантазии. Ведь речь пойдет о чем-то, что в корне отличается от всего

нам доселе известного. Уже из-за этого данная лекция будет самой трудной, поскольку она наиболее абстрактна и ее материал далек от нашего повседневного опыта. Но ничего не поделаешь. Если бы в своих лекциях, посвященных характеру физических законов, я обошел молчанием свойства микрочастиц, я заведомо не выполнил бы поставленной передо мной задачи. Эти свойства характерны абсолютно для всех элементарных частиц, они универсальны по своему характеру, так что если вы хотите слышать о характере физических законов, то мне необходимо поговорить о нем и в таком аспекте.

Правда, это не так-то просто. Но трудность здесь чисто психологическая — нас постоянно мучает вопрос: «Как же так может быть?», в котором отражается неконтролируемое, но совершенно необоснованное стремление представить себе все посредством чего-то очень знакомого. Я *не стану* проводить никаких аналогий с чем-нибудь всем нам знакомым, а просто расскажу, как обстоит дело. Было время, когда газеты писали, что теорию относительности понимают только двенадцать человек. Мне лично не верится, что это правда. Возможно, было время, когда ее понимал всего один человек, так как только он разобрался в том, что происходит, и не написал еще об этом статьи. После же того, как ученые прочли эту статью, многие так или иначе поняли теорию относительности, и, я думаю, их было больше двенадцати. Но, мне кажется, я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает. Так что не относитесь к этой лекции слишком серьезно, не думайте, что вам действительно необходимо понять ее содержание и построить себе какую-то мысленную модель. Передохните и попытайтесь просто поразвлечься.

Я собираюсь рассказать вам, как ведет себя Природа. И если вы просто согласитесь, что, возможно, она ведет себя именно таким образом, то вы увидите, что это очаровательная и восхитительная особа. Если сможете, не мучайте себя вопросом «Но как же так может быть?», ибо в противном случае вы зайдете в тупик, из которого еще никто не выбирался. Никто не знает, как же так может быть.

Итак, позвольте мне охарактеризовать поведение электронов или фотонов с типичной для квантовой механики точки зрения. Я буду пользоваться и сравнениями, и противопоставлениями. Если я попытаюсь ограничиться одними аналогиями, у нас ничего не выйдет. Здесь совершенно необходимо указывать не только на сходство с чем-то всем нам знакомым, но и на коренные отличия от всего нам зна-

комого. Поэтому я буду проводить сравнение и противопоставление сначала с поведением частиц, о которых я буду рассказывать на примере пуль, а затем с поведением волн на примере морских волн. Я собираюсь придумать один эксперимент и рассказать вам сначала, что получилось бы при таких условиях, если бы у нас были частицы, затем — что было бы, если бы это были волны, и, наконец, что происходит на самом деле в системе, где есть электроны или фотоны. Я разберу только этот эксперимент, который специально придуман таким образом, чтобы охватить все загадки квантовой механики и столкнуть вас со всеми парадоксами, секретами и странностями природы на все сто процентов. Оказывается, любой другой случай в квантовой механике всегда можно объяснить, сказав: «Помните наш эксперимент с двумя отверстиями? Здесь — то же самое». Вот я и собираюсь рассказать вам об опыте с двумя отверстиями. Именно в нем заключена основная загадка. Я не собираюсь ничего избегать. Я просто снимаю покровы с природы, с ее наиболее элегантных и трудноуловимых форм.

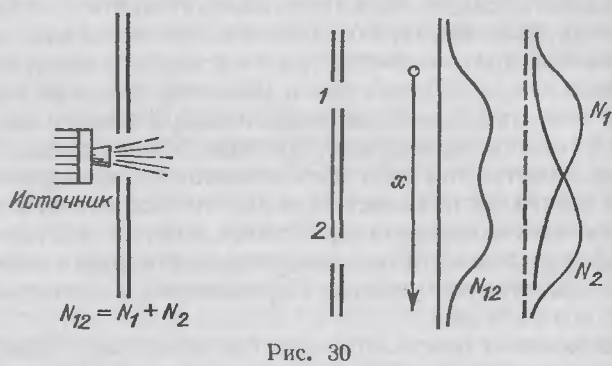


Рис. 30

Начнем с пуль (рис. 30). Пусть у нас имеется источник пуль, пулемет например, и перед ним установлен экран с отверстием, пропускающим пули, причем сам экран — это броневой щит. Теперь на большом расстоянии от первого щита поставим другой броневой щит с двумя отверстиями — те самые два знаменитых отверстия. Об этих отверстиях я буду говорить много раз, а поэтому назовем их отверстиями *1* и *2*. Можно представить себе, что отверстия круглые, а на рисунке показаны лишь их сечения. На большом расстоянии от второго щита поставим еще и третий, позволяющий устанавливать в разных местах детектор (для пуль это будет

просто ящик с песком), в котором пули застрянут, после чего их можно будет сосчитать. Теперь я буду проделывать такие опыты: я буду устанавливать свой детектор, или ящик с песком, в разных точках третьего щита, а затем подсчитывать, сколько пуль попадет в него. При этом я буду измерять расстояние между ящиком и какой-нибудь другой точкой на третьем щите, назову это расстояние $x$ и постараюсь выяснить, что происходит, если наш ящик передвигать вверх и вниз. Но прежде всего я хотел бы кое-что изменить, заменив настоящие пули идеализированными. Во-первых, будем предполагать, что пулемет сильно дрожит и качается и, следовательно, пули летят не только в одном, но и в других направлениях. К тому же они могут рикошетировать от краев отверстий в броневых щитах. Во-вторых, мы договоримся, хотя это не так уж и важно, что у всех пуль одинаковая энергия и скорость. Но самая важная идеализация, благодаря которой наши пули совсем не будут похожи на реальные, такова: мы будем предполагать, что пули абсолютно не разрушаются, так что в нашем ящике мы найдем не куски свинца от пули, расщепившейся надвое, а целую пулю. Представьте себе неразбивающиеся пули или очень твердые пули и мягкую броню.

Первое, что мы заметим в нашем опыте с пулями, это то, что все здесь происходит дискретными порциями. Например, энергия, поглощенная мишенью. Она может увеличиться только скачком на величину энергии дной пули: трах — и энергия увеличилась. Вы начинаете считать пули, и их одна, две, три, четыре — опять дискретные порции. Они все одинаковых размеров, и когда мы ставим наш ящик-детектор, в него либо попадает целая пуля, либо ничего не попадает. Более того, если взять два ящика, то в них не может войти одновременно по одной пуле, если только пулемет стреляет не слишком быстро и мы можем различить два последовательных выстрела. Замедлите темп стрельбы и проверяйте побыстрее оба ящика, и вы увидите: попасть одновременно в два ящика невозможно, потому что каждая пуля — это одна нерасчленяемая и опознаваемая порция.

Теперь я хочу выяснить, сколько пуль попадает в разные участки мишени в среднем за какой-нибудь период времени. Подождем, например, в течение часа, подсчитаем число пуль, попавших в наш ящик с песком, и усредним его. Теперь возьмем среднее число пуль, попавших в ящик за час, и назовем его вероятностью попадания, так как им определяется вероятность того, что, пройдя через щель, пуля попадает в какой-то определенный ящик. Конечно, число пуль,

попадающих в ящик, будет меняться вместе с $x$. На диаграмме я отложу по горизонтали число пуль, попадающих в ящик, если его установить в определенном положении, за один час. В результате у меня получатся плавные кривые (см. рис. 30), так как, если ящик поместить непосредственно за отверстием, в него попадет много пуль, а если его несколько сместить в сторону, это число уменьшится, ибо теперь приходится рассчитывать на то, что пули отскочат от краев отверстия, и в конце концов число пуль, попадающих в ящик, спадет до нуля. Полученные кривые мы обозначим через $N_1$, $N_2$ и $N_{12}$. Так, кривая $N_{12}$ (где индексы указывают на то, что открыты и отверстие *1*, и отверстие *2*) дает число пуль, зарегистрированных нашим детектором за час в случае, когда открыты оба отверстия.

Хочу вам напомнить, что показанные на диаграмме числа не обязательно целые. Они могут принимать любые значения. Это может быть 2,5 пули в час, хотя сами пули и попадают в ящик только дискретными порциями. Когда я говорю 2,5 пули в час, я имею в виду только то, что за 10 часов в ящик попадут 25 пуль, а, следовательно, их среднее количество за час составляет 2,5 пули. Конечно, все вы знаете шутку о том, что в средней американской семье два с половиной ребенка. При этом никто не утверждает, что есть семьи, в которых по полребенка,— дети определенно появляются на свет дискретными порциями. Тем не менее, если вычислить среднее число детей на семью, оно может оказаться и дробным. Точно так же число $N_{12}$, число пуль, попадающих в ящик в среднем за час, не обязательно целое. На самом деле мы измеряем им лишь вероятность попадания, как по-научному называется среднее число попаданий за единицу времени.

Наконец, рассматривая кривую $N_{12}$, мы можем заметить, что ее легко интерпретировать как сумму двух других кривых: одной, которую я обозначу через $N_1$ и которая описывает число попаданий, если отверстие *2* закрыто броневой заслонкой, и другой, $N_2$, описывающей число попаданий при открытом отверстии *2* и закрытом отверстии *1*. А это позволяет обнаружить очень важный закон: число попаданий при двух открытых отверстиях представляет собой простую сумму числа попаданий через одно отверстие *1* и числа попаданий через одно отверстие *2*. Это утверждение, этот факт, что вам нужно просто сложить два числа, мы станем обозначать словами «отсутствие интерференции»:

$$N_{12}=N_1+N_2 \text{ (отсутствие интерференции).}$$

Но хватит о пулях, и, покончив теперь с пулями, начнем все с самого начала, на этот раз с морскими волнами (рис. 31). Источником теперь служит большая масса, которую подымают и опускают вверх и вниз в воде. Броневые щиты заменим на длинный ряд барж или дамбу с проходом для воды. Возможно, все это легче понять на примере с обычной зыбью, чем с большими океанскими волнами. По крайней мере этот пример выглядит более разумным. Я могу

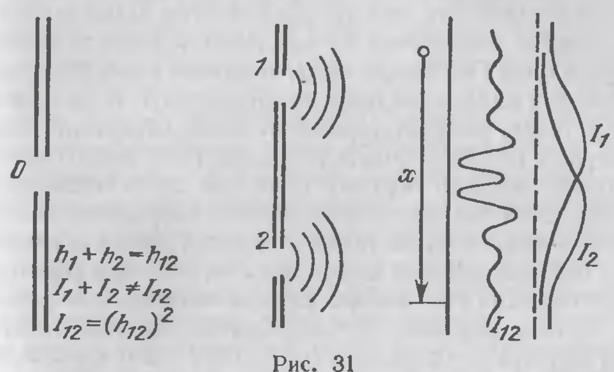



Рис. 31

просто болтать пальцем в воде, вызывая волнение, а в качестве экрана можно взять деревянную доску с отверстием, через которое волнение станет передаваться остальной воде. Затем установим еще одну доску с двумя отверстиями, а за ней еще и детектор. Что же мы собираемся измерять теперь? Детектор должен обнаружить степень волнения воды. Например, в воду можно бросить пробку и наблюдать за тем, как высоко она подымается и опускается на волнах. Я наблюдаю при этом за энергией колебаний пробки, но она в точности пропорциональна энергии, принесенной волнением. Еще одна деталь: болтать пальцем нужно очень равномерно, чтобы все волны были на равном расстоянии друг от друга. Говоря о таких волнах, прежде всего важно отметить, что величина, которую мы здесь измеряем, может принимать любые значения. Мы измеряем интенсивность волнения, или энергию колебаний пробки, и если волнение очень слабое, если я только слегка болтаю пальцем, то пробка будет колебаться еле-еле. Но при любой величине колебаний пропорциональность сохраняется. Колебания пробки могут быть любыми — они не увеличиваются дискретными порциями, и здесь нельзя сказать, что либо они есть, либо их нет.

Итак, мы собираемся измерять интенсивность волнения, или, точнее говоря, энергию, генерируемую волнением в не-

которой точке. Так как же меняется эта интенсивность, которую я стану обозначать $I_{12}$, чтобы постоянно напоминать вам, что речь идет именно об интенсивности, а не о числе каких-либо частиц? Кривая $I_{12}$, соответствующая двум открытым отверстиям, показана на диаграмме (рис. 31). Это очень интересная и внешне сложная кривая. Если мы станем менять положение детектора, мы получим интенсивность, меняющуюся очень быстро и очень странным образом. Возможно, вы знаете, чем это объясняется. Дело здесь в том, что волнение образуется из последовательности гребней и впадин, идущих из отверстия *1*, и другой последовательности гребней и впадин, идущих из отверстия *2*. Когда мы находимся в точке, равноотстоящей от обоих отверстий, обе волны (идущие от обоих отверстий) достигают своего максимума одновременно, и поэтому волнение здесь очень велико. Так что, если мы находимся точно посредине, волнение очень сильное. Если же поместить детектор в какую-нибудь точку, находящуюся от отверстия *2* на большем расстоянии, чем от отверстия *1*, то волне, идущей из отверстия *2*, понадобится больше времени, чтобы добраться до этой точки, чем волне, идущей от отверстия *1*. Поэтому в тот момент, когда в эту точку приходит гребень очередной волны, идущей от отверстия *1*, волна, идущая от отверстия *2*, может еще не достичь своего максимума и даже может быть в самой низшей точке, так что под действием одной волны вода пытается подняться, а под действием другой — опуститься, в результате чего она вообще не волнуется, или практически не волнуется. Так что в этой точке мы наблюдаем низкую интенсивность волнения. Затем, если сдвинуться от центра еще дальше, наступает момент, когда запаздывание между волнами от двух источников таково, что гребни обеих волн попадают в нашу точку одновременно, хотя один из этих гребней и принадлежит на самом деле следующей по порядку волне. Вот поэтому мы и получаем кривую, на которой за всплеском интенсивности следует провал, потом опять всплеск, опять провал... и все это в зависимости от характера «интерференции» гребней и впадин. Понятие интерференции — еще один пример необычного употребления повседневных слов *). В физике возможна такая интерференция, в результате которой суммарное волнение оказывается сильнее индивиду-

*) Эта (а также следующая) фраза станет понятна русскому читателю, если напомнить, что в английском языке существительное «interference» употребляется не только в научном смысле, как «интерференция», но и в повседневной речи, обозначая «вмешательство», «столкновение интересов».— *Примеч. пер.*

альных. Но самое важное, что $I_{12}$ не получается в виде суммы $I_1$ и $I_2$. Интерференция между двумя волнами приводит к усилению интенсивности в одном месте и к ослаблению в другом. Выяснить, на что похожи кривые $I_1$ и $I_2$, можно, закрывая по очереди одно из отверстий во втором экране и оставляя другое открытым. Очевидно, что в этом случае никакой интерференции нет, и соответствующие кривые показаны на рис. 31. Как нетрудно заметить, $I_1$ имеет тот же характер, что и $N_1$ в задаче с пулями, а $I_2$ похожа на $N_2$ и, несмотря на это, $I_{12}$ не имеет ничего общего с $N_{12}$.

Математика образования $I_{12}$ на самом деле довольно интересна. Дело в том, что высота воды, которую мы будем обозначать через $h$, в случае когда открыты оба отверстия, равна сумме высот, создаваемых волнением в случае одного открытого отверстия *1* и в случае одного открытого отверстия *2*. Поэтому, если из отверстия *2* приходит впадина волны, соответствующая высота $h$ отрицательна и она компенсирует положительную высоту $h$ для волны, пришедшей из отверстия *1*. Волнение воды можно характеризовать ее высотой, но оказывается, что интенсивность волнения в любом случае, например тогда, когда открыты оба отверстия, не совпадает с высотой воды в данной точке, а пропорциональна квадрату этой высоты. И именно потому, что мы имеем дело с квадратами, получаем наши очень интересные кривые:

$$h_{12}=h_1+h_2,$$

но

$$I_{12}\neq I_1+I_2 \quad \text{(интерференция)},$$
$$I_{12}=(h_{12})^2,$$
$$I_1=(h_1)^2,$$
$$I_2=(h_2)^2.$$

Это о волнении воды. Теперь об электронах (рис. 32), и снова с самого начала. В качестве источника возьмем накаленную нить, в качестве экранов — вольфрамовые пластинки с отверстиями, а в качестве детектора — любую электрическую систему с чувствительностью, достаточной для того, чтобы зарегистрировать заряд, приносимый электроном, независимо от мощности нашего источника. Если вам больше нравится, мы можем взять фотоны, вместо вольфрамовых пластинок — черную бумагу (но, по правде говоря, это не будет очень хорошая замена, ибо в бумаге, как и во всяком другом волокнистом материале, невозможно сделать отверстия с очень ровными краями, и нам придется поискать что-

нибудь получше), а в качестве детектора выбрать фотоумножитель, регистрирующий приход каждого фотона. Так что же произойдет в том или другом случае? Я расскажу вам лишь об опыте с электронами, потому что для фотонов все получается точно таким же образом.

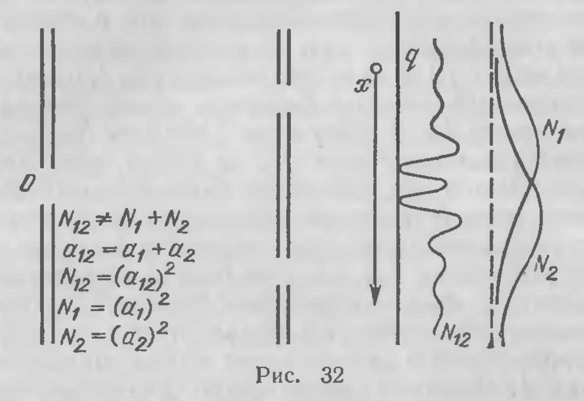



Рис. 32

Прежде всего мы заметим, что наш электрический детектор, на выходе которого мы поставим достаточно мощный усилитель, все время щелкает: электроны попадают в него дискретно, строго по порциям. Каждый щелчок — это заряд определенной величины, и эта величина все время постоянна. Если вы уменьшите накал источника, щелчки будут все реже, но все равно заряд каждого щелчка тот же, что и раньше. Если же усилить накал, щелчки посыплются, как из мешка, и в усилителе возникнет затор. Поэтому, для того чтобы прибор, который вы собираетесь использовать в качестве детектора, работал, нужно выбрать такой накал нити, при котором щелчки происходили бы не слишком часто. Затем, если поместить в другом месте другой точно такой же детектор и проследить за их работой одновременно, можно заметить, что никогда не бывает двух щелчков, происходящих одновременно, по крайней мере если накал достаточно слаб, а точность фиксации времени щелчка удовлетворительна. Если уменьшить интенсивность источника так, чтобы щелчки стали редкими и достаточно разнесенными друг от друга, то одновременно щелчков в обоих детекторах не бывает. А это значит, что возникающие события происходят дискретно, порциями, причем у каждой порции вполне определенная, постоянная для всех величин, и что в данный момент времени такая порция может находиться лишь в одном месте. Итак, электроны или фотоны попадают в детек-

тор по одному, дискретно, порциями. Поэтому мы можем поступить так же, как и в случае с пулями: мы можем измерить вероятность появления. Для этого нам нужно периодически менять положение детектора (конечно, если хочется, мы можем, хотя это и дорого, установить целую серию детекторов на поверхности последнего экрана и снимать кривую одновременно во всех точках), оставляя его в каждой конкретной точке, скажем, в течение часа, и записывать в конце этого часа число зарегистрированных электронов, а затем усреднить это число. Так что же мы получим для числа зарегистрированных электронов? Кривую $N_{12}$ того же типа, что и в опыте с пулями? Кривая $N_{12}$, соответствующая случаю, когда оба отверстия открыты, показана на рис. 32. Как видите, экспериментально установлено, что эта кривая оказывается такой же, как и в опыте с интерференцией волн. Но чему же соответствует эта кривая? Не энергии, заключенной в волнении, а вероятности попадания одной из этих порций в детектор.

Соответствующие математические выкладки чрезвычайно просты. Мы заменили $I$ на $N$, так что нам придется заменить $h$ на что-то другое, совсем новое,— это никакая не высота,— в связи с чем мы и придумаем параметр $a$, который будем называть амплитудой вероятности, так как мы все равно не знаем, что это значит. Тогда через $a_1$ обозначим амплитуду вероятности попадания сквозь отверстие *1*, а через $a_2$ — амплитуду вероятности попадания сквозь отверстие *2*. А для того чтобы определить амплитуду полной вероятности попадания, нужно сложить обе эти амплитуды, а сумму возвести в квадрат. Это будет точной имитацией того, что происходит с волнами, а пользоваться теми же математическими выкладками мы стали в этом случае потому, что результирующая кривая получается в нашем случае точно такой же, как и в опыте с волнами.

Теперь мне нужно проверить еще один факт: выяснить, есть ли здесь интерференция или нет. Ведь мы пока еще не говорили, что происходит, если закрыть одно из отверстий. Попытаемся проанализировать получающуюся любопытную кривую, предполагая, что электроны попадают в детектор либо через одно отверстие, либо через другое. Закроем одно из отверстий и измерим, сколько электронов попадает в различные участки последнего экрана через отверстие *1*. В результате получим простую крнвую $N_1$. Точно так же мы можем закрыть второе отверстие, измерить число электронов, попадающих в детектор через отверстие *2*, и получим кривую $N_2$. Тем не менее, если открыть оба отверстия, мы

не получим суммы $N_1+N_2$, так что интерференция действительно есть. Значит, в самом деле нужно при математических выкладках пользоваться этой странной формулой, согласно которой вероятность попадания равна квадрату амплитуды, которая в свою очередь представляет собой сумму двух слагаемых: $N_{12}=(a_1+a_2)^2$. Вопрос как раз и заключается в том, как же так может быть, что если электроны проходят лишь через отверстие *1*, они оказываются распределенными одним образом, когда они проходят лишь через отверстие *2*, они распределяются по-другому, но тем не менее в том случае, когда открыты оба отверстия, не получается суммы двух этих распределений. Например, если детектор установить в положении $q$ и открыть оба отверстия, в него практически ничего не попадет, но в то же время стоит мне закрыть одно из них, детектор начнет работать независимо от того, какое из отверстий было закрыто. Опять откроем оба отверстия, и вновь ничего. Мы позволили электронам пролетать в детектор через оба отверстия, а они сразу перестали прилетать совсем. Или выберем точку строго посредине: нетрудно убедиться, что здесь число прилетающих электронов больше суммы электронов, прилетающих через каждое отверстие по отдельности. Кажется, если подумать хорошенько, всегда можно найти какое-то объяснение: например, электроны могут возвращаться обратно через те же отверстия, а затем проходить через них еще раз, или с ними происходит какой-нибудь другой сложный процесс, или возникает возможность расщепления электрона на два, пролетающих через разные отверстия, или что-нибудь в этом роде, как-то объясняющее это явление. Но пока еще никому не удалось придумать удовлетворительное объяснение такого рода, потому что конечный вид математических закономерностей очень уж прост (суммарная кривая получается очень простой (см. рис. 32)).

Теперь подведем итог. Итак, электроны попадают в детектор дискретными порциями, как если бы это были частицы, но вероятности попадания этих частиц определяются по тем же законам, по каким определяется интенсивность волнения воды. Именно в этом смысле можно говорить, что с одной точки зрения электрон ведет себя, как частица, а с другой — как волна. Он ухитряется одновременно быть двумя совершенно разными понятиями (см. табл. 2).

Вот и все, что можно сказать по этому поводу.

Я мог бы привести сейчас математическое описание того, как вычислять вероятность попадания электрона при произвольных обстоятельствах, и, в принципе, на этом можно

Таблица 2

| Пули | Морские волны | Электроны (фотоны) |
|---|---|---|
| Дискретны | Могут быть любых размеров | Дискретны |
| Измеряется вероятность попадания | Измеряется интенсивность волнения | Измеряется вероятность попадания |
| $N_{12}=N_1+N_2$ | $I_{12}\neq I_1+I_2$ | $N_{12}\neq N_1+N_2$ |
| Интерференции нет | Обнаруживают интерференцию | Обнаруживают интерференцию |

было бы закончить лекцию. Но в том, что природа ведет себя именно так, а не иначе, есть несколько тонкостей. Мы сталкиваемся с целым рядом непонятных явлений, и именно о них мне и хотелось бы поговорить сейчас, поскольку они не вытекают сразу же из того, что рассказано мною выше.

Начнем с одного утверждения, казалось бы разумного, поскольку мы установили дискретный характер электронов или фотонов. Так как в детектор приходит нечто целое (электрон в нашем примере), по-видимому, разумно предположить, что электрон попадает в детектор либо через отверстие *1*, либо через отверстие *2*. Кажется очевидным, что, так как электрон нечто целое и неделимое, ничего другого и не может быть. Назовем это утверждение утверждением *А*.

Утверждение *А*:

*Электрон попадает в детектор*
*либо через отверстие 1,*
*либо через отверстие 2.*

На самом деле мы уже немного говорили о том, что происходит с утверждением *А*. Если бы было верно, что электрон попадает в детектор либо через отверстие *1*, либо через отверстие *2*, то общее число зарегистрированных электронов должно было бы распадаться на сумму электронов двух типов. Общее число этих электронов было бы суммой числа электронов, прилетевших через первое отверстие, и числа электронов, прилетевших через второе. Но так как суммарную кривую не удается представить таким удобным образом в виде суммы двух других кривых и поскольку эксперимент, позволяющий регистрировать прилетающие электроны в случае, когда открыто только одно отвестие, показыва-

ет, что в случае двух отверстий мы не наблюдаем суммы двух вероятностей появления, приходится заключить, что это утверждение неверно. Но если неверно, что электрон попадает в детектор либо через отверстие *1*, либо через отверстие *2*, может быть, он временно распадается на две половины или что-нибудь в этом роде. Итак, утверждение *A* ложно. Такова логика. К сожалению или нет, но логику можно проверять экспериментально. Теперь нам нужно решить, что же происходит на самом деле. Попадает ли электрон в детектор либо через отверстие *1*, либо через отверстие *2*, или, может быть, он успевает проскочить каждое из отверстий по нескольку раз в разных направлениях, или расщепляется временно на две части, или что-нибудь другое в этом же духе.

Нам нужно всего лишь понаблюдать за поведением электронов. А для этого нам нужен свет. Поэтому за отверстиями мы и поместим очень мощный источник света. Электроны рассеивают свет, который отражается от них, и, если свет достаточно силен, вы сможете заметить пролетающие электроны. Отойдем теперь назад и попытаемся увидеть, что происходит в момент регистрации электрона или на какую-то долю секунды до этого. Наблюдается ли вспышка за отверстием *1* или *2*, или, быть может, так сказать, по полвспышки за каждым из этих отверстий? Ведь это позволит нам, наблюдая, найти, что же происходит в самом деле. Итак, включим свет, начнем наблюдать, и вот тебе на — каждый раз перед щелчком нашего детектора вспыхивает только одно отверстие — либо *1*, либо *2*. Оказывается, всегда, абсолютно во всех случаях, электрон, когда мы за ним наблюдаем, попадает в детектор либо через отверстие *1*, либо через отверстие *2*. Парадокс!

Постараемся теперь загнать природу в угол. Сейчас я вам расскажу, что для этого нужно сделать. Мы оставим наш источник света включенным и станем одновременно и наблюдать за вспышками, и считать число пролетающих электронов. Из результатов этих наблюдений составим два столбца: один — в котором мы станем отмечать электроны, пролетевшие через отверстие *1*, и другой — регистрирующий электроны, пролетевшие через отверстие *2*, а по мере того как будет щелкать наш детектор, станем отмечать в этих столбцах, какой их электронов попал в него. Так как же будет выглядеть столбец *1*, после того как я сложу все результаты, соответствующие одному и тому же положению детектора? Что я увижу, если я наблюдаю лишь за отверстием *1*? Я получу кривую $N_1$ (рис. 32). Этот столбец оказывается распределенным точно так же, как если бы мы считали, что второе

отверстие закрыто. Здесь ничего не меняется от того, наблюдаем мы за полетом электронов или нет. Если мы закроем отверстие *2*, получим то же распределение прилетающих электронов, какое мы получаем, оставляя его открытым и наблюдая за отверстием *1*. То же самое получается в результате наблюдения за отверстием *2*; на этот раз получается кривая $N_2$. Но, послушайте, суммарное число зарегистрированных детектором электронов *должно* быть суммой. Оно должно равняться сумме числа $N_1$ и числа $N_2$, так как относительно каждого из пролетевших отверстия электронов известно, какому, первому или второму, столбцу он принадлежит. Суммарное число зарегистрированных электронов *просто не может быть ничем другим*, кроме суммы этих двух чисел. Оно должно распределяться как $N_1+N_2$. Но ведь мы говорили, что оно распределено как $N_{12}$. Нет, оно распределено как $N_1+N_2$. Конечно, на самом деле так оно и есть. Так должно быть, и так оно и есть. Если мы пометим штрихом величины, относящиеся к опыту с зажженным светом, то окажется, что $N_1'$ практически не отличается от $N_1$ для опыта без источника света, а $N_2'$ очень мало отличается от $N_2$. Но число $N_{12}'$, наблюдаемое в случае, когда свет горит и оба отверстия открыты, равно сумме числа частиц, которые мы видели пролетающими через отверстие *1*, и числа электронов, пролетевших, как мы видели, через отверстие *2*. Вот к какому результату мы приходим, включив свет. Значит, в зависимости от того, включим мы свет или нет, мы получим разные результаты. Зажжем свет, и распределение будет описываться кривой $N_1+N_2$. Выключим свет, и распределение сразу примет вид $N_{12}$. Включим его снова, и снова получим $N_1+N_2$. Вы видите, природа опять вывернулась! Приходится говорить, что свет влияет на результат. Если свет включен, то вы получите другой результат, чем если бы он был выключен. Вы можете еще сказать, что свет влияет на поведение электронов. Если мы станем говорить об экспериментальном исследовании движения электронов, что не совсем точно сказано, то можно утверждать, что свет влияет на это движение, в результате чего электроны, которые сами по себе попали бы в верхнюю часть последнего экрана, отклоняются, так сказать, сбиваются со своей траектории и попадают в нижнюю часть, сглаживая распределение таким образом, что в результате получается простонапросто сумма $N_1+N_2$.

Электроны очень чувствительны. Когда вы смотрите на бейсбольный мяч и видите, как он сверкает на солнце, это ничего не значит, его траектория от этого не меняется. Но

если свет падает на электрон, он сталкивает его с пути, и вместо того, чтобы делать одно, электрон делает совсем другое. Ведь вы включили свет, да к тому же такой сильный. Предположим тогда, что мы попытаемся ослабить этот свет все больше и больше, пока он не станет совсем тусклым, и воспользуемся очень чувствительными детекторами, позволяющими наблюдать очень тусклые вспышки при очень слабом освещении. Свет становится все слабее и слабее, а очень и очень слабый свет не должен бы изменять поведение электронов настолько сильно, что это радикальным образом отразится на картине распределения, изменив ее с $N_{12}$ на $N_1+N_2$. По мере того как свет становится все более тусклым, картина все больше и больше должна напоминать то, что мы получили в отсутствие света. Так как же происходит преобразование одного распределения в другое? Прежде всего, свет — это не морская волна. Свет также ведет себя как поток частиц, называемых фотонами, и по мере уменьшения интенсивности света вы не ослабляете эффекта, а уменьшаете число фотонов, испускаемых источником. Ослабляя свет, я получаю все меньше и меньше фотонов. Самое меньшее, что может рассеиваться на электроне,— это один фотон, и если число имеющихся в нашем распоряжении фотонов слишком мало, некоторые электроны проскакивают через отверстие в тот момент, когда поблизости нет ни одного фотона, а в этом случае я его и не увижу. Поэтому слабый свет не значит, что мы используем маленькое возмущение, а значит только, что у нас мало фотонов. В результате, если свет достаточно слаб, мне придется ввести третий столбец для электронов, которые я «не увидел». Если свет очень яркий, в третий столбец попадает лишь несколько электронов, если он очень слаб — почти все. Итак, у нас оказалось три столбца: для отверстия *1*, для отверстия *2* и для незамеченных электронов. Нетрудно догадаться, что получится у нас теперь. Замеченные электроны распределены как $N_1+N_2$, а те, которые я не увидел,— как $N_{12}$. По мере того как я делаю свет все слабее и слабее, все большую и большую часть электронов заметить мне так и не удается. А реально полученное распределение представляет собой смесь этих двух кривых, так что, по мере ослабления света, оно все более напоминает $N_{12}$ и переход этот совершается непрерывно.

Здесь я не имею возможности говорить о всех бесконечно разнообразных методах, которые можно было бы придумать для выяснения того, через какое отверстие пролетел зарегистрированный электрон. Но каждый раз оказывается,

что невозможно поставить свет таким образом, чтобы можно было, с одной стороны, сказать, через какое отверстие пролетает наш электрон, а с другой — не исказить картины распределения регистрируемых электронов, не нарушить характера интерференции. И так происходит не только со светом, а с чем угодно, чем бы мы ни пользовались. Просто это принципиально невозможно. Конечно, можно, если хотите, изобрести целый ряд методов обнаружения, и каждый из них будет показывать, что электрон пролетает либо через одно отверстие, либо через другое. Но если вы попытаетесь построить ваш прибор таким образом, чтобы при этом он еще и не влиял на движение электрона, вы добьетесь лишь того, что вновь не сможете сказать, через какое же отверстие пролетел электрон, и результаты ваших наблюдений вновь окажутся запутанными.

Когда Гейзенберг открывал законы квантовой механики, он заметил, что эти новые законы природы оказываются непротиворечивыми только в том случае, если можно принять, что наши экспериментальные возможности принципиально ограничены некоторым образом, хотя мы и не замечали этого ранее. Другими словами, в эксперименте нельзя добиться по желанию сколь угодно большой чувствительности. В связи с этим Гейзенберг предложил свой принцип неопределенности, который по отношению к описанному выше эксперименту выглядит следующим образом (Гейзенберг сформулировал его по-другому, но обе формулировки эквивалентны и от одной можно перейти к другой): «Нельзя сконструировать какой-либо прибор, при помощи которого можно было бы определить, через какое из отверстий пролетит электрон, не изменив при этом его движения настолько, что это разрушит интерференционную картину». И еще никому не удалось обойти этот принцип. Уверен, что у вас просто чешутся руки, так вам хочется изобрести новый метод, позволяющий обнаружить, через какое отверстие пролетел электрон. Но после тщательного исследования любого из методов окажется, что он не годится. Вам покажется, что вы знаете, как это сделать, не влияя на электрон, но вы увидите, что всегда есть какая-нибудь загвоздка и что всегда различие в наблюдаемых картинах можно объяснить влиянием приборов, предназначенных для определения того, через какое отверстие пролетел электрон.

Это одна из основных характеристик природы, и она говорит нам кое-что обо всем. Если завтра найдут новую частицу, каон,— по правде говоря, каон уже найден, но ведь новую частицу нужно как-то назвать, так что назовем ее каоном,—

я воспользуюсь каонами для того, чтобы при их помощи определить, через какое отверстие пролетит электрон. Я знаю заранее — по крайней мере я надеюсь, что это так,— вполне достаточно о свойствах этой еще не известной мне частицы, чтобы быть уверенным в том, что она не может сказать мне, через какое отверстие пролетел электрон, и не изменить при этом картины с интерференционной на безынтерференционную. Поэтому принципом неопределенности можно пользоваться как общим принципом, позволяющим предсказывать наперед многие характеристики неизвестных объектов. Вероятные свойства таких объектов не могут быть какими угодно.

Вернемся к нашему утверждению $A$ —«электрон должен пролететь либо через отверстие *1*, либо через отверстие *2*». Правильно это или нет? Физики научились обходить западни. Они взяли за правило думать следующим образом. Если у вас есть прибор, позволяющий определять, через какое отверстие пролетел электрон (а такой прибор *можно* сделать), то вы можете утверждать, что он пролетает либо через одно отверстие, либо через другое. Так оно и происходит: когда вы следите за электроном, он пролетает либо через одно отверстие, либо через другое. Но если у вас нет такого прибора, то вы и не можете сказать, что он пролетает либо через одно отверстие, либо через другое. (Вернее, всегда можно *сказать*, что это так, если вы на этом сразу остановитесь и не станете пытаться сделать из этого какие-либо выводы. Физики же предпочитают просто не говорить этого, вместо того чтобы говорить и не делать никаких выводов.) Исходить же из того, что электрон пролетает либо через одно отверстие, либо через другое, когда вы этого не видите, значило бы основывать свои предсказания на ошибочной предпосылке. Вот тот логический канат, на котором приходится балансировать, если мы хотим заниматься объяснением явлений природы.

Утверждение, о котором мы говорим, носит самый общий характер. Оно относится не только к опыту с двумя отверстиями, и его можно сформулировать в общем виде следующим образом. Вероятность любого события в идеальном эксперименте — т. е. эксперименте, где все определено настолько точно, насколько только это возможно,— равна квадрату некоторой другой величины $a$, которую мы назвали амплитудой вероятности. Если это событие может происходить в нескольких взаимно исключающих вариантах, то амплитуда вероятности $a$ получается как сумма значений $a$ для каждого из возможных вариантов (альтернатив). Но

если в нашем эксперименте можно выяснить каждый раз, в каком именно варианте произошло событие, вероятность события меняется: теперь это просто сумма вероятностей каждого из вариантов. Другими словами, интерференция уничтожается.

Но остается нерешенным вопрос, а как же так получается? Каким образом все так выходит? К сожалению, этого никто не знает. Никто не сможет дать вам более глубокого объяснения явления, чем то, какое я вам только что дал, а ведь я всего лишь описал его вам. Можно лишь расширить объяснение, приведя больше примеров, показывающих, что действительно невозможно, не разрушая интерференционной картины, узнать, через какое отверстие пролетел электрон. Можно рассказать про более широкий круг экспериментов, а не только об одном опыте с двумя отверстиями и интерференцией двух картинок. Но это значило бы лишь повторять одно и то же снова и снова, пытаясь заставить вас поверить в реальность рассказываемого. Такие объяснения ничуть не глубже, они лишь шире. Конечно, можно уточнить математические выкладки, можно сказать, что здесь нужно пользоваться комплексными, а не вещественными числами, отметить одну или две другие второстепенные детали, не имеющие прямого отношения к основной идее. Но настоящая загадка заключается в том, о чем я вам только что рассказал, и сегодня никто не знает, как здесь можно копнуть глубже.

До сих пор мы занимались вычислением вероятности попадания электрона. Возникает вопрос, а можно ли каким-либо образом узнать, куда же на самом деле попадает каждый отдельный электрон? Конечно, мы не прочь использовать теорию вероятностей, т. е. подсчитывать наши шансы, в очень сложной ситуации. Когда мы подбрасываем монету, то, учитывая всякие сопротивления, все эти атомы и другие подобные сложности, мы вполне допускаем, что наших знаний недостаточно для точного предугадывания. Поэтому мы удовлетворяемся вычислением шансов того или иного исхода. Но ведь в опытах с электронами речь идет совсем не об этом — здесь мы предполагаем, не правда ли, что вероятность лежит в самой основе всего, что подсчет шансов начинается уже с фундаментальных законов физики.

Предположим, я так организовал мой эксперимент, что при выключенном свете наблюдается интерференционная картина. Тогда я могу сказать, что, даже включив свет, я не смогу предсказать, через какое отверстие пролетит электрон. Я только знаю, что каждый раз, когда я увижу его, он

будет либо в одном отверстии, либо в другом, но предсказать, в каком именно, заранее невозможно. Другими словами, будущее здесь непредсказуемо. Никаким способом невозможно предсказать, пользуясь любой информацией, полученной заранее, через какое отверстие пролетит электрон или в каком отверстии мы его увидим. Это значит, что физика в некотором смысле отбросила задачу, если только такая задача и стояла вначале (всем казалось, что так оно и было!) — собрать достаточно сведений для того, чтобы при известных условиях суметь предсказать, что́ за этим последует. Вот вам условия опыта: источник электронов, источник сильного света, вольфрамовый экран с двумя отверстиями — а ну-ка скажите мне, за каким из отверстий я увижу следующий электрон. Согласно одной из теорий это невозможно потому, что за всем этим скрывается очень сложный процесс: какие-то внутренние маховички, зубчатые колесики, что-то еще, и в зависимости от того, в каком они сейчас состоянии, электрон полетит либо через одно отверстие, либо через другое. Вероятности того и другого события равны, поскольку, как и в опыте с монетой, состояние всей этой «машины» зависит от случая. И когда наша физика будет полной, мы сможем предсказывать, через какое отверстие полетит электрон. Это называют теорией скрытых параметров. Такая теория не может быть правильной. Мы не можем предсказывать совсем не потому, что нам не хватает подробностей.

Я уже сказал, что, когда свет не включен, у меня должна получаться интерференционная картина. Если же при данных условиях наблюдается интерференционная картина, то ее невозможно анализировать, рассуждая, что этот электрон пролетел через первое отверстие, а этот — через второе, поскольку интерференционная кривая предельно проста и в то же время совершенно не похожа на сумму двух других распределений вероятности. Но если бы мы могли определить, через какое отверстие полетит электрон при включенном свете, то уже не имело бы никакого значения, включен этот свет на самом деле или выключен. Каково бы ни было устройство источника электронов, позволяющее нам предсказывать, через какое отверстие полетит электрон, нам удалось бы проследить за ним, не включая света, и, следовательно, сказать, не включая света, через какое отверстие он прошел. Но если так, то суммарное распределение не может не распадаться на сумму распределений электронов, прошедших через отверстие *1*, и электронов, прошедших через отверстие *2*, а на самом деле этого нет. Поэтому в лю-

бом случае, когда эксперимент выявляет интерференцию электронов при выключенном свете, невозможно допустить, чтобы мы могли заранее получать информацию о том, через какое отверстие пролетит электрон при включенном или при выключенном свете. Так что вовсе не незнанием внутреннего механизма, внутренней сложности источника электронов объясняется появление вероятностных законов природы. По-видимому, это в какой-то степени неотъемлемое свойство природы. Кто-то выразился об этом так: «Даже сама природа не знает, по какому пути полетит электрон».

Один философ сказал: «Для самого существования науки совершенно необходимо, чтобы в одних и тех же условиях всегда получались одни и те же результаты». Так вот, этого не получается. Вы сможете точно воспроизвести все условия, и все-таки не сможете предсказать, в каком отверстии вы увидите электрон. Тем не менее, несмотря на это, наука жива, хотя в одних и тех же условиях не всегда получаются одни и те же результаты.

Что совершенно необходимо «для самого существования науки» и каковы характеристики природы — все это определяется не напыщенными декларациями, а тем материалом, с которым мы имеем дело, самой природой. Мы наблюдаем и видим то, что нам удалось узнать, и мы не можем заранее правильно предсказать, на что это будет похоже. Самые правдоподобные домыслы часто не соответствуют реальному положению вещей. И если наука должна двигаться вперед, то чтó нам действительно необходимо, так это возможности экспериментирования, честность в сообщениях о результатах,— о них нужно сообщать, не обращая внимания на то, какими их кто-то хотел бы видеть,— и наконец, и это очень и очень важно, умение разумно интерпретировать результаты. При этом нельзя держаться предвзятого мнения и говорить: «Это мало правдоподобно; мне это не нравится». Предвзятое мнение и абсолютная уверенность — это далеко не одно и то же. Конечно, я говорю не об абсолютной предвзятости, а только о простом предубеждении. Если вы просто предубеждены, это не так уж и важно, ибо если ваша точка зрения неверна, постоянное накопление опровергающих свидетельств начнет действовать вам на нервы, и настанет момент, когда вы уже не сможете отмахиваться от них. Поэтому в действительности для самого существования науки совершенно необходимо вот что — светлые умы, не требующие от природы, чтобы она удовлетворяла каким-то заранее придуманным условиям, как того требует наш философ.

# В ПОИСКАХ НОВЫХ ЗАКОНОВ

Строго говоря, то, о чем я собираюсь говорить в этой лекции, нельзя назвать характеристикой законов физики. Когда мы рассуждаем о характере физических законов, мы можем по крайней мере предполагать, что говорим о самой природе. Но теперь мне хочется поговорить не столько о природе, сколько о нашем отношении к ней. Мне хочется рассказать вам о том, что мы считаем сегодня известным, что еще предстоит отгадать, и о том, каким образом угадывают законы в физике. Кто-то даже предложил, что лучше всего, если я по мере моего рассказа мало-помалу объясню вам, как угадать закон, а в заключение открою для вас новый закон. Не знаю, удастся ли мне это сделать.

Прежде всего я хочу рассказать вам о нынешнем состоянии физики, о том, что в ней сейчас известно. Вы могли бы подумать, что все это я уже вам рассказал, так как в предыдущих лекциях я изложил вам все основные известные законы. Но всякий закон должен быть законом для *чего-то*: закон сохранения энергии говорит об энергии *чего-то*, законы квантовой механики — это законы квантовой механики *чего-то* — и все эти законы, вместе взятые, еще не говорят нам о том, какова же природа, о которой здесь столько говорилось. Поэтому мне хочется сейчас рассказать вам немного о том материале, которым движут все эти законы. Прежде всего о материи: как это ни удивительно, вся материя одинакова. Известно, что материя, из которой сделаны звезды, такая же, как и материя, из которой сделана Земля. Характер света, испускаемого звездами, дает нам, так сказать, отпечатки пальцев, по которым можно установить, что там атомы того же типа, что и на Земле. Оказывается, и живая, и неживая природа образуется из атомов одинакового типа. Лягушки сделаны из того же материала, что и камни, но только материал по-разному использован. Все это упрощает нашу задачу. У нас есть атомы и ничего больше, а атомы однотипны, и однотипны повсюду.

Все атомы, по-видимому, имеют одинаковую структуру. У них есть ядра, окруженные электронами. Можно составить список частиц, из которых, как мы думаем, построен наш мир и о которых, по нашему мнению, мы знаем (табл. 3). Прежде всего в нем стоят электроны — частицы, составляющие внешнюю оболочку атома. Затем имеется ядро, но на сегодня считается, что оно само состоит из частиц двух различных типов, называемых нейтронами и протонами. Вот вам и еще две частицы. Мы глядим на звезды и видим атомы, они испускают свет, а сам свет состоит из частиц, называемых фотонами. В самом начале наших лекций мы говорили о тяготении, гравитации, и если только квантовая теория верна, то и у гравитации должны быть какие-то волны, ведущие себя и как частицы. Такие частицы называют гравитонами. А если вы не верите в их существование, называйте их просто гравитацией. Наконец, я уже упоминал о β-распаде, во время которого нейтрон может распадаться на протон, электрон и нейтрино, вернее антинейтрино. Так что у нас есть еще одна частица — нейтрино. Кроме всех этих частиц у нас есть еще, конечно, и все соответствующие античастицы. Это короткое замечание сразу без каких-либо затруднений удваивает число известных нам частиц.

Таблица 3

| | |
|---|---|
| Электроны<br>Фотоны<br>Гравитоны<br>Нейтрино | Нейтроны<br>Протоны |
| + античастицы | |

При помощи только что перечисленных частиц можно объяснить все явления, протекающие при низкой энергии, и даже все обычные явления в любой части Вселенной. Но когда в дело вступают частицы с очень высокой энергией, это уже неверно, и в лабораторных условиях нам удалось воспроизвести некоторые очень странные явления. Если же пренебречь такими исключительными случаями, то все обычные явления могут быть объяснены взаимодействием и движением перечисленных выше частиц. Например, сама жизнь, по общему мнению, может быть, в принципе, объяснена движением атомов, а эти атомы состоят из нейтронов, протонов и электронов. Я должен сразу же оговориться — когда мы говорим, что что-то, в принципе, может быть объяснено таким-то образом, мы имеем в виду следующее: если бы нам удалось во всем разобраться до конца, то оказалось бы, что для понимания явлений живой природы не нужно открывать никаких новых законов физики. Еще один пример. Тот факт, что звезды испускают энергию, солнечную или звезд-

ную, также можно объяснить ядерными реакциями между этими частицами. По крайней мере так считается. При помощи такой модели удается правильно описать всякого рода подробности поведения атома, насколько только это нам известно сегодня. Я могу даже утверждать, что среди известных на сегодня явлений нет такого, относительно которого мы были бы уверены, что его нельзя объяснить подобным образом или хотя бы, что такое объяснение связано с решением какой-то глубокой загадки.

Но так было не всегда. Например, известны явления так называемой сверхпроводимости, когда металл при очень низких температурах проводит электричество, не оказывая ему какого-либо сопротивления. С первого взгляда совсем не было очевидным, что это явление есть следствие уже известных законов. Но теперь, когда в нем достаточно внимательно разобрались, оказалось, что и в самом деле оно полностью объясняется на основе уже имеющихся знаний. Сейчас мы знаем о других явлениях, например о явлении телепатии, которые нам не удается объяснить на основании имеющихся у нас физических знаний. Однако существование такого рода явления пока еще не установлено с полной достоверностью, и мы не можем гарантировать его существования. Если этот факт удалось бы подтвердить экспериментальным путем, это означало бы, что наша физика неполна, и вот почему физики так заинтересованы в том, чтобы выяснить, возможно ли такое восприятие или нет. Сейчас многие опыты показывают, что такого восприятия нет. Аналогичное положение с астрологией. Если от звезд действительно зависит, в какой день лучше идти к зубному врачу,— а именно так выглядит наша американская астрология,— то наши представления о физике неверны, ибо мы не представляем себе механизма, построенного, вообще говоря, на взаимодействии перечисленных выше частиц и объясняющего такое влияние. Этим и объясняется тот скептицизм, с которым ученые относятся к подобным теориям.

Правда, в случае гипноза с первого взгляда дело выглядело так, как будто такое объяснение невозможно. Но так было только, пока это явление оставалось недостаточно изученным. Ныне мы знаем о нем намного больше, и теперь считается вполне возможным, что гипноз можно объяснить обычными, хотя пока еще и не известными физиологическими процессами. Очевидно, что для его объяснения не понадобится какой-то силы нового типа.

Сегодня, когда наша теория всего, что происходит вне ядра атома, выглядит довольно точной и полной и позволя-

ет нам, хотя, может быть, и не сразу, рассчитывать все с той же точностью, с какой мы можем проводить измерения, мы намного меньше знаем о силах взаимодействия между нейтронами и протонами, образующими ядро, и недостаточно хорошо понимаем их характер. Я хочу сказать, что на сегодня мы не понимаем характера взаимодействий между нейтронами и протонами достаточно хорошо для того, чтобы я смог, если вы меня об этом попросите, предоставив достаточно времени и достаточно вычислительных машин, точно определить все энергетические уровни углерода или решить другую задачу того же типа. Наших знаний для этого недостаточно. Мы умеем решать аналогичную задачу для энергетических уровней внешних электронов атома, а для ядра — нет, так как мы еще недостаточно понимаем природу внутриядерных сил.

Для того чтобы лучше разобраться в этих силах, были поставлены специальные опыты по изучению явлений при очень высоких энергиях. Суть этих опытов заключается в том, чтобы сталкивать между собой нейтроны и протоны с очень большой энергией и наблюдать возникающие при этом необычные явления, причем мы надеемся, что изучение этих необычных явлений даст нам лучшее понимание взаимодействия между нейтронами и протонами. Но эти эксперименты лишь открыли сосуд Пандоры. Хотя мы только хотели получше разобраться в характере сил, действующих между нейтронами и протонами, мы, с силой сталкивая эти частицы, обнаружили много новых частиц. Пытаясь лучше разобраться во внутриядерных силах, мы выловили более полусотни новых частиц, которые можно отнести в тот же столбец (см. табл. 4), что и нейтрон и протон, так как они взаимодействуют с этими частицами и имеют отношение к взаимодействию между ними. Кроме того, пока наши сети вылавливали всю эту мелочь, в них попалась пара частиц, не имеющих отношения к проблеме внутриядерных сил.

Таблица 4

| | |
|---|---|
| Электроны<br>Фотоны<br>Гравитоны<br>Нейтрино<br>μ-мезоны (мюоны)<br>μ-нейтрино | Нейтроны<br>Протоны<br><br><br>(+ более 4-х десятков других частиц) |
| + все античастицы | |

Одну назвали μ-мезоном или мюоном, а другую — нейтрино, причем вторая всегда сопровождает первую. Имеется два типа нейтрино: нейтрино одного типа всегда сопутствует электрону, а нейтрино другого типа — μ-мезону. Между прочим, к нашему крайнему удивлению, все законы поведения пары μ-мезон и нейтрино сейчас уже изучены настолько полно, насколько об этом можно судить на современном уровне экспериментальной техники, и оказались в точности такими же, как и для пары электрон и нейтрино, за единственным исключением: масса μ-мезона оказалась в 207 раз больше массы электрона. Но это единственная разница между ними, и это довольно странно. Четыре дюжины новых частиц образуют пугающий список, а ведь нужно еще помнить и об античастицах. У новых частиц разные названия: мезоны, пионы, каоны, лямбды, сигмы... все это ничего вам не скажет, для четырех дюжин новых частиц пришлось придумать немало новых названий! Но оказалось, что частицы образуют семейства, и это несколько облегчает наше положение. На самом деле срок жизни некоторых из этих так называемых частиц настолько мал, что до сих пор идут споры, возможно ли в действительности хотя бы установить их существование. Но в эти споры я не хочу здесь вдаваться.

Для того чтобы вы получили представление о том, что такое семейство элементарных частиц, рассмотрим случай нейтрона и протона. Нейтрон и протон имеют одинаковую массу с точностью до десятой процента или около того. Первая из них в 1836 раз, а вторая в 1839 раз тяжелее электрона. Еще замечательнее, что внутриядерные силы, большие силы взаимодействия внутри ядра между двумя протонами, оказались такими же, как и силы взаимодействия между протоном и нейтроном или нейтроном и нейтроном. Другими словами, изучая лишь сильные внутриядерные взаимодействия, нельзя отличить протон от нейтрона. Получается еще один закон симметрии: нейтрон можно заменить на протон — и ничего не изменится — при условии, что мы говорим только о сильных взаимодействиях. Но если нейтрон действительно заменить на протон, то разница будет огромная, так как протон несет электрический заряд, а нейтрон — нет. Посредством электрических измерений вы сразу обнаружите разницу между протоном и нейтроном, так что наша симметрия, позволяющая заменить протон на нейтрон, на самом деле лишь приближенная симметрия. Она действительно существует для сильных ядерных взаимодействий, но в глубоком физическом смысле ее нет, поскольку она не охватывает электрических явлений. Такую закономерность мы называ-

ем слабой симметрией, и нам приходится разбираться со слабыми симметриями.

Теперь, когда семейства элементарных частиц уже построены, известно, что подстановки типа замены нейтрона протоном возможны и для более широкого круга частиц. Но разница при такой замене оказывается еще большей. Утверждение, что нейтрон всегда можно заменить протоном, верно лишь приближенно, оно неверно с точки зрения теории электричества, но более широкий круг подстановок, которые оказались возможными, обеспечивает еще худшую симметрию. Тем не менее все эти слабые симметрии позволили организовать элементарные частицы в отдельные семейства и благодаря этому найти место для недостающих частиц и открыть некоторые новые частицы.

Игра такого рода — грубое угадывание отношений, определяющих некоторое семейство,— характерна для первых схваток с природой, предваряющих открытие какого-то действительно глубокого и очень важного закона. Прошлое науки дает много примеров тому. Игрой именно такого рода было открытие Менделеевым *) периодической таблицы элементов. Это было лишь первым шагом. Полное понимание причин такого строения таблицы Менделеева пришло много позднее, с теорией атома. Точно так же наши знания о ядерных энергетических уровнях были организованы Марией Майер и Йенсеном **) в их так называемой оболочечной модели ядра. Точно такую же игру представляет собой и вся физика в целом, где для упрощения мы прибегаем к приближениям и гипотезам.

Кроме всех этих частиц у нас имеются все те принципы, о которых мы говорили раньше: принципы симметрии и относительности, принцип, согласно которому все это должно подчиняться законам квантовой механики, да еще вытекающие из теории относительности соображения о локальном характере законов сохранения.

Но если собрать все эти принципы вместе, мы обнаружим, что их слишком много. Они несовместимы друг с дру-

---

*) Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907) — русский химик.

**) Мария Гёпперт-Майер (1906—1972) — американский физик, получившая в 1963 г. Нобелевскую премию, с 1960 г.— профессор физики в Калифорнийском университете.

Ханс Даниель Йенсен (1907—1973) — немецкий физик, лауреат Нобелевской премии за 1963 г., с 1949 по 1968 гг.— директор Института теоретической физики при Гейдельбергском университете (ФРГ).

гом. Если взять квантовую механику, теорию относительности, утверждение, что все должно быть локальным, и еще несколько молчаливых предположений, то мы придем к противоречию, потому что, вычисляя некоторые величины, получим для них бесконечно большие значения. А кто может утверждать, что бесконечность согласуется с реальностью природы? Что же касается молчаливых предположений, о которых я упомянул, то к ним мы настолько привыкли, что не хотим или не можем понять их истинное значение. Вот вам пример. Если вы подсчитаете вероятность ряда взаимно исключающих событий, скажем, 50 % за то, что случится это, 25 % за то, что случится то, и т. д., то в сумме они должны составлять единицу. Мы считаем, что если сложить все вероятности, то должна получиться 100 %-ная вероятность. Это кажется разумным, но именно с разумного и начинаются все наши беды. Другой пример: предположение о том, что энергия всегда должна быть положительной и не может стать отрицательной. И еще одно предположение, которое, по-видимому, принимается еще до того, как мы приходим к противоречиям, это так называемый принцип причинности, согласно которому, грубо говоря, следствие никогда не может предшествовать причине. Пока еще никто не пытался построить теорию, в которой не было бы предположения о полной вероятности или не учитывался бы принцип причинности и которая согласовалась бы с квантовой механикой, теорией относительности, принципом локальности и т. п. Поэтому мы просто не можем знать, какое же именно из наших допущений вызывает наши трудности и заставляет получать бесконечно большие значения. Вот это была бы настоящая задача! Правда, как оказалось, с помощью довольно грубых приемов все эти бесконечности удается замести под ковер, так что мы все еще в состоянии делать необходимые нам расчеты.

Вот так обстоит дело сейчас. А теперь я собираюсь поговорить о том, как открывают новые законы.

Вообще говоря, поиск нового закона ведется следующим образом. Прежде всего о нем догадываются. Затем вычисляют следствия этой догадки и выясняют, что повлечет за собой этот закон, если окажется, что он справедлив. Затем результаты расчетов сравнивают с тем, что наблюдается в природе, с результатами специальных экспериментов или с нашим опытом, и по результатам таких наблюдений выясняют, так это или не так. Если расчеты расходятся с экспериментальными данными, то закон неправилен. В этом простом утверждении самое зерно науки. Неважно, насколь-

ко ты умен, кто автор догадки, известен он или нет — если теория расходится с экспериментом, значит теория неверна. Вот и все. Верно, конечно, что для того чтобы окончательно убедиться в неверности теории, нужна небольшая дополнительная проверка. Ведь кто бы ни был экспериментатор, всегда есть возможность, что о результатах опытов было неправильно сообщено, что в эксперименте что-то было упущено, что здесь есть какая-то грязь или еще что-то, или что тот, кто проводил расчеты эффектов, ошибся в ходе анализа, хотя бы это и был сам автор гипотезы. Все эти замечания совершенно естественны, и поэтому, когда я говорю: «Поскольку расчеты не согласуются с опытом, предложенный закон неверен», я считаю, что правильность эксперимента и расчета была установлена и после всестороннего анализа мы убедились в том, что наблюдаемые явления действительно логически следуют из принятой нами гипотезы и что она действительно расходится с предельно тщательно выверенным экспериментом.

У вас может сложиться не совсем правильное представление о науке. Вам может показаться, будто мы все время строим догадки, а затем проверяем их на экспериментах, так что эксперименту отводится подчиненная роль. Но на самом деле экспериментаторы вполне самостоятельные люди. Они любят экспериментировать даже до того, как кто-нибудь что-нибудь придумает, и очень часто работают в таких областях, в которых теоретики заведомо не делали еще никаких догадок. Например, мы можем знать много законов, но мы не знаем, справедливы ли они на самом деле при очень высоких энергиях, так как предположение об их справедливости — всего лишь хорошая гипотеза. Экспериментаторы пытаются ставить опыты с высокими энергиями, и время от времени они сталкиваются с трудностями — то, что мы считали правильным, оказывается неверным. Таким образом, эксперименты могут привести к неожиданным результатам, а это заставляет нас выдвигать новые догадки. В качестве одного примера неожиданного экспериментального результата можно указать на открытие $\mu$-мезона и нейтрино, о существовании которых никто не предполагал до тех пор, пока они не были открыты, и даже теперь никто не знает, как можно было бы догадаться о существовании этих частиц.

Конечно, вы понимаете, что такой метод позволяет только опровергнуть любую определенную теорию. Если только у нас есть какая-нибудь теория, какая-нибудь настоящая гипотеза, при помощи которой мы можем обычными методами предсказать результат эксперимента, то этого, вообще

говоря, достаточно, чтобы покончить с этой теорией, как бы хороша она ни была. У нас всегда есть возможность опровергнуть теорию, но, обратите внимание, мы никогда не можем доказать, что она правильна. Предположим, что вы выдвинули удачную гипотезу, рассчитали, к чему это ведет, и выяснили, что все ее следствия подтверждаются экспериментально. Значит ли это, что ваша теория правильна? Нет, просто-напросто это значит, что вам не удалось ее опровергнуть. В будущем вы смогли бы рассчитать более широкий круг следствий, провести более широкие экспериментальные исследования и выяснить, что ваша теория неверна. Вот почему у законов типа законов движения планет Ньютона такая долгая жизнь. Ньютон угадал закон всемирного тяготения, вывел из него самые различные следствия для Солнечной системы, сравнил их с результатами наблюдений — и потребовалось несколько столетий, прежде чем было замечено незначительное отклонение движения планеты Меркурий от предсказанного. На протяжении всех этих лет теория Ньютона не была опровергнута, и временно ее можно было считать верной. Но ее правильность никогда нельзя было доказать, потому что уже завтра эксперимент, может быть, покажет вам неправильность того, что вам казалось верным еще сегодня. Можно только удивляться тому, что нам удается придумывать теории, которые выдерживают натиск эксперимента столь длительное время.

Один из верных способов остановить прогресс науки — это разрешить эксперименты лишь в тех областях, где законы уже открыты. Но экспериментаторы усерднее всего ведут поиск там, где вероятнее всего найти опровержение наших теорий. Другими словами, мы стараемся как можно скорее опровергать самих себя, ибо это единственный путь прогресса. Например, сегодня среди обычных явлений с низкой энергией мы не знаем, где найти какую-нибудь неувязку, нам кажется, что здесь все в порядке, а поэтому и нет широкого фронта исследований ядерных реакций или явлений сверхпроводимости, направленных на поиск слабых мест. В настоящих лекциях я сосредоточил все внимание на открытиях фундаментальных законов. Правда, физика в целом, а это не менее важно, включает в себя и другой уровень исследований, интерпретацию явлений типа ядерной реакции или сверхпроводимости с точки зрения этих фундаментальных законов. Но сейчас я говорю о поисках слабых мест, каких-то ошибок в фундаментальных законах, и так как никто не знает, где найти такое место среди явлений низкой энергии, все экспериментаторы сегодняшнего

дня, занятые поиском новых законов, ищут их в области высоких энергий.

Я хотел бы еще отметить, что чем менее конкретна теория, тем труднее ее опровергнуть. Если ваша догадка сформулирована плохо или достаточно неопределенно и если метод, которым вы пользуетесь для оценки последствий, не очень конкретен — вы не чувствуете уверенности и говорите: «Мне кажется, что здесь все правильно, так как все это объясняется тем-то и тем-то, а из этого более или менее следует вот это, и похоже, что я могу объяснить, как получается, что...», то ваша теория всем хороша — ведь ее нельзя опровергнуть. Кроме того, если ваш метод расчетов последствий не достаточно четок, при некоторой ловкости всегда можно сделать так, чтобы результаты экспериментов были похожи на предполагаемые последствия. Возможно, вы знаете об этом по собственному опыту в других областях. Некто ненавидит свою мать. Причина, конечно, в том, что она не заботилась о нем и не любила его достаточно, когда он был маленьким. Но если вы начнете раскапывать прошлое, то окажется, что на самом деле мать его очень любила и все у них было хорошо. Ну, тогда ясно, она его слишком баловала! Как видите, расплывчатая теория позволяет получать любой результат. Поправить ее можно было бы следующим образом. Если бы вы смогли в точности и заранее определить, сколько любви недостаточно, а сколько чересчур много, то мы могли бы построить совершенно законную теорию, пригодную для экспериментальной проверки. Но стоит об этом заикнуться, как вам скажут: «Такие точные определения невозможны, когда речь идет о психологии». Но раз так, то нельзя утверждать, что вы что-нибудь знаете.

Вы можете ужаснуться, но у нас в физике есть примеры точно такого же типа. У нас есть эти слабые симметрии, с которыми приходится иметь дело следующим образом. У вас есть какая-то слабая симметрия, и вы вычисляете последствия в предположении, что она совершенно точная. Сравниваем результаты расчетов с экспериментом и видим, что они расходятся. Ну, ясно, ведь симметрия, о которой идет речь, только приближенная, так что если опыт согласуется с расчетами удовлетворительным образом, вы говорите: «Прекрасно!», а если они плохо согласуются между собой, вы говорите: «Здесь мы сталкиваемся с случаем особой чувствительности к нарушению симметрии». Это, конечно, смешно, но нам приходится двигаться вперед именно таким образом. Когда область исследования нова, а с новыми элементарными частицами мы познакомились совсем недавно, такой са-

моебман, такое «прощупывание» наугад и составляет первые шаги науки. Относительно принципов симметрии физики справедливо все то, что можно сказать и о психологии, так что не нужно слишком смеяться. Вначале нужно только быть очень осторожным. При помощи расплывчатых теорий такого рода легко забраться в глухой тупик. Опровергнуть подобную теорию нелегко, и для того чтобы в такой игре не оказаться выброшенным за борт, требуется немалая смекалка и опыт.

На этом пути угадывания, вычисления следствий и сравнения с экспериментальными результатами можно застрять в самых разных местах. Можно застрять на стадии угадывания, когда у нас нет плодотворной идеи. Или можно застрять при вычислении последствий. Например, Юкава *) в 1935 г. предложил теорию ядерных сил, но никто не может рассчитать ее следствий из-за чисто математических трудностей, а следовательно, невозможно и проверить эту теорию на эксперименте. Эта теория оставалась в нетронутом виде в течение длительного времени, пока мы не открыли все эти дополнительные частицы, которых совершенно не предвидел Юкава, а следовательно, не все обстоит так просто, как считает его теория. Еще одна стадия, на которой можно застрять,— это стадия эксперимента. Например, квантовая теория гравитации продвигается вперед очень медленно, если только вообще продвигается, из-за того, что в любом реально осуществимом эксперименте квантовые эффекты и гравитация никогда не выступают одновременно. Гравитационные силы слишком слабы по сравнению с электрическими.

Но я физик-теоретик и получаю больше удовольствия от теоретической стороны процесса. А поэтому мне хочется более подробно поговорить о том, как делаются догадки.

Как я уже говорил раньше, совсем не важно, откуда родилась та или иная догадка, важно только, чтобы она согласовалась с экспериментом и была по возможности определенной. «Ну,— скажете вы,— да ведь это совсем просто. Нужно построить машину, большую вычислительную машину, со своего рода рулеткой, которая станет предлагать одну за другой разные теории, и каждый раз, как она делает догадку и предлагает гипотезу о свойствах природы, она немедленно вычисляет всякого рода следствия и производит сравнения с некоторым набором экспериментальных результа-

---

*) Хидэки Юкава (1907—1981) — японский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1949 г.

тов, в нее заложенных». Другими словами, догадки — это работа для дурака. На самом же деле все совсем наоборот, и я постараюсь объяснить вам, почему это так.

Прежде всего возникает вопрос: с чего начать? Вы скажете: «Я бы начал со всех уже известных принципов». Но все известные нам принципы несовместимы друг с другом, так что от чего-то нам нужно отказаться. Мы непрерывно получаем десятки писем, в которых настаивают, чтобы мы пожертвовали чем-то в наших догадках, в наших теориях. В одном письме нам пишут: «Вы все время говорите, что пространство непрерывно. Но откуда вы знаете, как только речь заходит о достаточно малых отрезках, что в них содержится достаточно много точек и что это не просто большое число дискретных точек, разделенных маленькими промежутками?» Или: «Знаете ли, эти квантовомеханические амплитуды вероятности — это так сложно и непонятно. И что заставляет вас думать, что так оно и есть? Может быть, вы неправы?» Такие возражения очевидны и совершенно ясны всякому, кто работает над этими проблемами. Указывая на них, вы никому не принесете пользы. Задача состоит не в том, чтобы указать на возможную ошибку, а в том, чтобы в точности указать, как ее можно исправить, чем заменить отброшенное. Например, в случае непрерывного пространства предположим, что точное утверждение таково: пространство состоит из последовательности точек, и промежутки между ними не имеют никакого смысла, а все точки организованы в кубическую решетку. Тогда нетрудно показать, что это утверждение ложно. Оно не проходит. Задача не в том, чтобы просто сказать, что это неверно, а в том, чтобы заменить старое утверждение чем-то новым, а это не так-то просто. Как только вы подставите вместо отвергнутого что-то действительно определенное, почти сразу становится ясным, что это предложение не годится.

Вторая трудность в том, что число возможных предложений бесконечно. Все это выглядит примерно так. Вы сидите и трудитесь в поте лица, вы работаете уже давно — и все для того, чтобы открыть сейф. Но тут появляется умник, который понятия не имеет, что вы тут делаете, а знает только, что надо открыть сейф, и говорит: «А почему бы не попробовать комбинацию 10 : 20 : 30?» Но ты не сидел сложа руки, ты ведь испробовал тысячу комбинаций, может быть, ты уже попробовал и комбинацию 10 : 20 : 30. Может, ты уже знаешь, что средние цифры — это 32, а не 20. Или уже установил, что в комбинации всего пять цифр... Так что, будьте добры, не посылайте мне писем, в которых вы пытаетесь

объяснить мне, как все должно быть. Я их читаю — я их всегда читаю, для того чтобы убедиться в том, что я уже думал о том, что в них предлагается,— но отвечать на них слишком долго, так как, по правде говоря, они все на уровне «давайте попробуем комбинацию 10 : 20 : 30». Обычно у природы гораздо больше воображения, чем у нас, как мы видели на примере других, очень тонких и глубоких теорий. А выдвинуть такую тонкую и глубокую гипотезу совсем не просто. Для того чтобы догадаться, нужно быть по-настоящему умным, и это невозможно сделать вслепую на машине.

Теперь я хочу рассказать вам об искусстве угадывания законов природы. Это действительно искусство. Как же это делается? Для того чтобы попытаться получить ответ на этот вопрос, можно, например, обратиться к истории науки и посмотреть, как это делали другие. Вот поэтому мы и займемся историей.

Нам нужно начать с Ньютона. Он находился в таком положении, что его знания были неполными, и он мог угадывать законы, сопоставляя понятия и представления, которые лежали близко к эксперименту. Между наблюдениями и экспериментальной проверкой не было дистанции огромного размера. Таков первый способ, но сегодня при его помощи вам вряд ли удастся добиться успеха.

Следующим великим физиком был Максвелл,открывший законы электричества и магнетизма. Вот что он сделал. Он объединил все законы электричества, открытые Фарадеем и другими учеными, работавшими до него, разобрался в том, что у него получилось, и понял, что с математической точки зрения один из этих законов противоречит другим. Для того чтобы все это выправить, ему нужно было добавить в уравнения еще одно слагаемое. Так он и сделал, придумав для себя модель из расположенных в пространстве шестеренок и зубчатых колес. Он нашел, каким должен быть новый закон, но никто не обращал на этот закон никакого внимания, так как никто не верил в его механизмы. Сегодня мы тоже не верим в эти механизмы, но полученные Максвеллом уравнения оказались правильными. Так что рассуждения могут быть неправильными, а ответ — верным.

В случае с теорией относительности характер открытия был совершенно другим. К этому времени накопилось много парадоксов: известные законы давали взаимно исключающие результаты. Формировался новый тип анализа — с точки зрения возможной симметрии физических законов. Ситуация была особенно сложной, ибо впервые стало ясно, что законы (и пример тому законы Ньютона) очень долго могут считать-

ся правильными и все же в конце концов оказаться неверными. Кроме того, было трудно поверить, что могут быть неверными такие обычные, казалось бы, от рождения нам присущие представления о пространстве и времени.

К открытию квантовой механики мы пришли двумя совершенно разными путями — и пусть это послужит нам уроком. Здесь вновь, и даже в большей степени, накопилось огромное число парадоксов, открытых экспериментальным путем, и их никак не удавалось разрешить на основании уже известных законов. Дело было не в том, что нам не хватало знаний, а в том, что их было слишком много. Вы предсказываете, что должно происходить одно, а на самом деле происходит совсем другое. Два разных пути были выбраны Шредингером *), который угадал основное направление, и Гейзенбергом, утверждавшим, что нужно исследовать только то, что может быть измерено. Эти два совершенно различных философских подхода привели в конце концов к одному открытию.

В самое последнее время в связи с открытием уже упомянутых мною законов слабых взаимодействий (распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино, о которых далеко еще не все известно) возникла совсем другая ситуация. На этот раз нам просто не хватало знаний и догадки строились лишь о виде уравнений. Но теперь особенную трудность представляло то, что все эксперименты оказались неправильными. А как можно угадать правильный ответ, если каждый теоретический результат расходится с экспериментом? Для того чтобы утверждать, что эксперимент неверен, требуется немалое мужество.

Сейчас у нас нет парадоксов, по крайней мере на первый взгляд. Правда, у нас есть эти бесконечности, которые вылезают наружу при попытке объединить все законы в единое целое, но люди так набили руку на том, как прятать весь мусор под ковер, что порой начинает казаться, будто это не так уж серьезно. Как и прежде, то, что мы открыли все эти частицы, ни о чем не говорит кроме того, что наши знания неполны. Я уверен, что в физике история не повторится, как это видно из уже приведенных примеров, и вот почему. Любая схема типа «ищите законы симметрии», или «запишите все, что вы знаете, в математической форме», или «угадайте уравнения» сейчас уже всем известна, и такими схе-

---

*) Эрвин Шредингер (1887—1961) — австрийский физик-теоретик, совместно с Полем Дираком получивший Нобелевскую премию по физике за 1933 г.

мами все время пытаются пользоваться. Если вы застряли, ответ не может быть получен по одной из этих схем потому, что прежде всего вы попробовали использовать именно их. Каждый раз нужно искать новый путь. Каждый раз, когда образуется длительный затор, когда накапливается слишком много нерешенных задач, это происходит потому, что мы пользуемся теми же методами, которыми пользовались раньше. Новую же схему, новое открытие нужно искать совсем на другом пути. Так что от истории науки не следует ждать особой помощи.

Хочу остановиться теперь коротко на идее Гейзенберга, согласно которой не нужно говорить о том, что все равно нельзя измерить. Дело в том, что об этом толкуют многие, по-настоящему не понимая смысла этого утверждения. Его можно интерпретировать следующим образом: ваши теоретические построения или открытия должны быть такими, чтобы выводы из них можно было сравнивать с результатами эксперимента, т. е. чтобы из них не получилось, что «один тук равняется трем нукам», причем никто не знает, что такое эти самые тук и нук. Ясно, что так дело не пойдет. Но если теоретические результаты можно сравнить с экспериментом, то это все, что нам требовалось. Это вовсе не значит, что ваши туки и нуки не могут появляться в первоначальной гипотезе. Вы можете впихнуть в вашу гипотезу сколько угодно хлама при условии, что ее следствия можно будет сравнить с результатами экспериментов. А это не всем до конца понятно. Часто приходится слышать жалобы на то, что мы совершенно необоснованно распространяем на сферу атомной физики наши представления о частицах, траекториях и т. п. Но ведь это совсем не так, в подобной экспансии нет ничего необоснованного. Мы просто обязаны, мы вынуждены распространять все то, что мы уже знаем, на как можно более широкие области, выходить за пределы уже постигнутого. Опасно? Да. Ненадежно? Да. Но ведь это единственный путь прогресса. Хотя этот путь неясен, только на нем наука оказывается плодотворной. Ведь наука приносит пользу только тогда, когда говорит вам о еще непоставленных экспериментах. Она никому не нужна, если позволяет судить лишь о том, что известно из опыта, что только что произошло. Поэтому всегда необходимо распространять идеи за рамки того, на чем они уже опробованы. Например, закон всемирного тяготения, который был придуман для объяснения движения планет, был бы бесполезен, если бы Ньютон просто сказал: «Теперь я знаю, как ведут себя планеты»,— и не считал бы себя вправе применять его к силам

притяжения Луны Землей, а его последователи — предполагать: «А может быть, и галактики удерживаются силами тяготения». Мы должны пробовать такие идеи. Конечно, можно сказать: «Когда переходишь к масштабам галактик, можно ожидать чего угодно, поскольку мы ничего об этом не знаем». Верно, но такое ограничение — это конец науке. Сейчас у нас нет окончательно выработавшегося представления о законах поведения галактик. Если же предположить, что их поведение целиком объясняется уже известными законами, такое предположение будет конкретным и определенным, и его легко экспериментально опровергнуть. Гипотезы именно такого рода, вполне определенные и легко сравнимые с экспериментом, мы и ищем. На самом деле, все известное нам о поведении галактик на сегодняшний день не опровергает, по-видимому, предположения, сделанного нами выше.

Можно привести еще один пример, еще более интересный и важный. Самой плодотворной мыслью, сильнее всего стимулирующей прогресс в биологии, является, по-видимому, предположение о том, что все, что делают животные, делают атомы, что в живой природе все результат каких-то физических и химических процессов, а сверх этого ничего нет. Конечно, всегда можно сказать: «Когда переходишь к живой природе, все возможно». Но если вы встанете на такую точку зрения, вы никогда не поймете законов живой природы. Понятно, очень трудно поверить, что извивающиеся щупальца осьминога — это лишь игра атомов, подчиняющихся известным законам физики. Но если исследовать такое движение, пользуясь подобной гипотезой, то оказывается, что мы можем довольно точно угадывать его характер. А тем самым мы добиваемся большого прогресса.

В догадках нет ничего ненаучного, хотя многие не занимающиеся наукой и думают, что это так. Несколько лет назад мне пришлось разговаривать с одним дилетантом о летающих тарелках: поскольку я ученый, я должен знать о летающих тарелках всю подноготную! Я объяснил ему, что не думаю, чтобы летающие тарелки действительно существовали. Это возмутило моего собеседника. «Разве существование летающих тарелок невозможно? Разве вы можете доказать, что это невозможно?» — горячился он. «Нет,— отвечаю я,— доказать этого я не могу. Просто это очень маловероятно».— «Но рассуждать так совершенно ненаучно,— продолжал наступать мой оппонент,— если вы не можете доказать, что это невозможно, как же можно позволить себе говорить, что это маловероятно?» Но это и есть самый научный способ рассуждений. Наука говорит как раз о том,

что более и что менее вероятно, а не доказывает каждый раз, что возможно, а что нет. Если бы я хотел высказаться более определенно, то мне нужно было бы сказать так: «Видите ли, на основании своих представлений об окружающем нас мире я считаю, что сообщения о летающих тарелках являются скорее результатом известной иррациональности мышления жителей нашей планеты, чем неизвестных рациональных усилий мыслящих существ с других планет». Просто первое из предположений гораздо более правдоподобно, и все тут. Это просто хорошая гипотеза. А мы всегда стараемся придумать самое правдоподобное объяснение, не забывая при этом о том, что если оно вдруг окажется негодным, нам придется заняться исследованием других возможностей.

Но как угадать, что нужно сохранять, а чем можно и пожертвовать? У нас столько прекрасных принципов и известных фактов — и все-таки у нас не сходятся концы с концами. То мы вновь получаем бесконечно большие значения, то наше объяснение оказывается неполным — чего-то недостает. Иногда это значит, что нам нужно расстаться с какой-то идеей. По крайней мере в прошлом всегда оказывалось, что для того чтобы выйти из аналогичного затруднения, приходилось пожертвовать каким-то глубоко укоренившимся представлением. Весь вопрос как раз и сводится к тому, что сохранить, а что отбросить. Если пожертвовать сразу всем, то это заведет нас слишком далеко, и у нас практически ничего не останется для работы. В конце концов, закон сохранения энергии кажется разумным, он удобен, и мне не хотелось бы с ним расстаться. Для того чтобы угадать, что сохранить и что отбросить, требуется немалое мастерство. Поправде говоря, я вполне допускаю, что дело здесь только в удаче, но выглядит все именно так, как если бы для этого требовалось большое мастерство.

Амплитуды вероятностей выглядят очень странно, и с первого взгляда вы совершенно уверены, что эта новая теория безусловно нелепа. Но все, что можно вывести из представления о квантовомеханических амплитудах вероятности, как бы странно это представление ни выглядело, оказывается верным, и так на протяжении всей теории странных частиц, на все 100 %. Поэтому я не думаю, что когда мы откроем законы внутренней структуры нашего мира, эти представления окажутся неправильными. Мне кажется, что эта часть физики правильна, но я только высказываю предположение, я рассказываю вам, как я строю догадки. В то же время теория, согласно которой пространство

непрерывно, мне кажется неверной, потому что она приводит к бесконечно большим величинам и другим трудностям. Кроме того, она не дает ответа на вопрос о том, чем определяются размеры всех частиц. Я сильно подозреваю, что простые представления геометрии, распространенные на очень маленькие участки пространства, неверны. Говоря это, я, конечно, всего лишь пробиваю брешь в общем здании физики, ничего не говоря о том, как ее заделать. Если бы я это смог, то я закончил бы лекцию новым законом.

Некоторые, указывая на противоречивость принципов физики, говорят, что существует только один внутренне непротиворечивый мир, а поэтому если мы соберем все принципы вместе и будем вычислять все очень и очень точно, то сможем не только вывести все настоящие принципы, но и обнаружить, что это единственные принципы, которые могут существовать при том условии, что все должно оставаться внутренне непротиворечивым. Мне такой замах кажется слишком большим. Мне кажется, это все равно, что «вилять» собакой, держа ее за хвост. Я думаю, что необходимо принять существование некоторых вещей,— не всех 50 с лишним частиц, но нескольких маленьких частиц вроде электрона и т. п.,— а затем вероятно, окажется, что вся наблюдаемая сложность устройства нашего мира является естественным следствием этого факта и справедливости определенных принципов. И я не думаю, что все это можно получить из одних рассуждений и внутренней непротиворечивости.

Другая стоящая перед нами задача связана с наличием слабых симметрий. Существование таких симметрий вроде утверждения, что нейтрон и протон совершенно одинаковы, за исключением их электрических свойств, или что принцип зеркального отображения верен всюду, кроме реакции одного типа, все это очень досадно. Казалось бы, все симметрично, но на самом деле не до конца. По этому вопросу сейчас существуют две различные точки зрения. Одна утверждает, что на самом деле все просто, что на самом деле все симметрично и что все дело в небольших осложнениях, немного нарушающих идеальную симметрию. Другая школа, у которой всего один последователь,— это я, не согласна с этим и верит, что все очень сложно и что простота достигается лишь через сложность. Древние греки считали, что планеты движутся по круговым орбитам. На самом же деле эти орбиты эллиптические. Они не идеально симметричны, но очень мало отличаются от окружностей. Возникает вопрос, а почему они симметричны только приближенно? Почему они так мало отличаются от окружностей? Из-за долго-

временного и очень сложного эффекта приливного трения — это очень сложная теория. Очень может быть, что в глубине души природа совершенно несимметрична, но в хитросплетениях реальности она начинает выглядеть почти симметричной, и эллипсы начинают походить на окружности. Вот вам и другая возможность. Но никто не знает ответа наверняка, все это просто догадки.

Предположим, что имеются две теории *A* и *B*, совершенно различные с психологической точки зрения, построенные на совершенно разных принципах и т. д., но такие, что все вытекающие из них следствия в точности одинаковы и совпадают с экспериментом. Итак, у нас есть две гипотезы, которые поначалу звучат совсем по-разному, но все выводы из которых оказываются одинаковыми (это обычно нетрудно показать математически, доказав, что логика теорий *A* и *B* всегда приводит к одинаковым результатам). Предположим, что такие две теории существуют, и зададим себе вопрос, на каком же основании мы отдадим предпочтение одной из них. Наука этого не знает, так как каждая из них согласуется с экспериментом в одинаковой степени. Поэтому две теории, основывающиеся, возможно, на глубоко различных принципах, могут быть с математической точки зрения идентичными, и не существует научного метода выяснения, какая из них верна.

Однако с психологической точки зрения обе эти теории могут быть совершенно не равноценными для угадывания новых теорий: ведь они построены совсем на разных фундаментах. Находя для теории место в определенной схеме понятий, вы можете вдруг разглядеть, что́ здесь требует изменения. Например, в теории *A* что-то говорится о чем-то, а вы скажете: «Вот это нужно изменить». Но выяснить, что нужно изменить в другой теории для того, чтобы прийти к эквивалентному результату, может быть очень сложным, и додуматься до этого, может быть, совсем не просто. Другими словами, предполагаемое изменение может быть совершенно естественным для одной теории и столь же неестественным для другой, хотя до него они были абсолютно тождественны. Вот почему, учитывая психологию научного творчества, мы должны помнить о всех этих теориях и вот почему каждый приличный физик-теоретик знает шесть или семь теоретических обоснований одних и тех же физических фактов. Он знает, что они эквивалентны и что никто и никогда не сможет решить, оставаясь на этом же уровне, какая из этих теорий верна, но он помнит о них всех, надеясь, что это подскажет ему разные идеи для будущих догадок.

А это напоминает мне еще об одном вопросе, о том, что совсем незначительные поправки к теории могут потребовать радикальной перестройки понятий и представлений, лежащих в ее основе. Например, представления Ньютона о пространстве и времени прекрасно согласовались с экспериментом, но для того, чтобы правильно объяснить движение планеты Меркурий, а оно едва заметно отличалось от того, что получалось по теории Ньютона, потребовались колоссальные изменения в характере всей теории. Причина этого кроется в том, что законы Ньютона были весьма просты, весьма совершенны и давали вполне определенные результаты. Для того чтобы построить теорию, которая вносила бы едва заметные поправки, ее нужно было полностью изменить. Формулируя новый закон, нельзя ввести неидеальности в идеальную схему: нужна совершенно новая идеальная теория. Вот почему так велика разница в философии теории гравитации Эйнштейна и теории всемирного тяготения Ньютона.

Что же такое идейное обоснование физической теории? На самом деле это просто ловкий способ быстро делать вывод. Философская или, как ее еще иногда называют, идеологическая интерпретация закона является лишь способом, позволяющим держать этот закон в голове в виде, пригодном для быстрого отгадывания его следствий. Некоторые говорят (и они правы в случае, например, уравнений Максвелла): «Бросьте вы вашу философию, все эти ваши фокусы, а лучше угадывайте-ка правильные уравнения. Задача лишь в том, чтобы вычислять ответы, согласующиеся с экспериментом, и если для этого у вас есть уравнения, нет никакой нужды в философии, интерпретации или любых других словах». Это, конечно, хорошо в том смысле, что, занимаясь одними уравнениями, вы свободны от предрассудков и вам легче отгадывать неизвестное. Но, с другой стороны, может быть, именно философия помогает вам строить догадки. Здесь трудно сделать окончательный выбор.

Пусть те, кто настаивает на том, что единственно важным является лишь согласие теории и эксперимента, представят себе разговор между астрономом из племени майя и его студентом. Майя умели с поразительной точностью предсказывать, например, время затмений, положение на небе Луны, Венеры и других планет. Все это делалось при помощи арифметики. Они подсчитывали определенное число, вычитали из него другое и т. д. У них не было ни малейшего представления о вращении небесных тел. Они просто знали, как вычислять время следующего затмения или время полнолуния и т. п. Так вот, представьте себе, что к нашему астроно-

му приходит молодой человек и говорит: «Вот что мне пришло в голову. Может быть, все это вертится, может, это шары из камня или что-нибудь в этом роде, и их движение можно рассчитывать совсем иначе, не просто, как время их появления на небе».— «Хорошо,— отвечает ему астроном,— а с какой точностью это позволит нам предсказывать затмения?» — «До этого я еще не дошел»,— говорит молодой человек. «Ну, а мы можем вычислять затмения точнее тебя,— отвечает ему астроном,— так что не стоит дальше возиться с твоими идеями, ведь математическая теория, очевидно, лучше». И практически каждый раз, когда у кого-нибудь появляется свежая идея сегодня и он говорит: «А может быть, все происходит вот так», ему спешат возразить: «А какое решение такой-то и такой-то задачи у вас тогда получится?» — «Ну, до этого я еще не дошел»,— следует ответ. «А мы уже продвинулись гораздо дальше и получаем очень точные ответы». Как видим, нелегкая задача решить, стоит или не стоит задумываться над тем, что кроется за нашими теориями.

Еще один метод работы, конечно, состоит в выдумывании новых принципов. В теории гравитации Эйнштейн сверх всех остальных принципов придумал принцип, основанный на идее, что силы всегда пропорциональны массам. Он догадался, что если вы сидите в разгоняющемся автомобиле, то вы не сможете отличить свое состояние от того, в котором вы оказались бы в поле тяжести. Добавив этот последний принцип ко всем остальным, он смог правильно угадать уравнения гравитационного поля.

Я показал вам несколько различных путей новых открытий. Хотелось бы теперь сделать несколько дополнительных замечаний относительно их конечных результатов. Прежде всего, что же у нас получается после того, как все кончено и мы построили некоторую математическую теорию, позволяющую предсказывать результаты экспериментов? Вот тут-то и начинаются чудеса. Для того чтобы решить, что произойдет с атомом, мы составляем правила со значками, нарисованными на бумаге, вводим их в машину, в которой имеются переключатели, включающиеся или выключающиеся каким-то сложным образом, а результат говорит нам о том, что должно произойти с атомом! Если бы законы, по которым включаются и выключаются все эти переключатели, были какой-то моделью атома, если бы мы считали, что в атоме есть аналогичные переключатели, я бы сказал, что я еще более или менее понимаю, в чем тут дело. Мне лично кажется чрезвычайно удивительным, что прогнозировать можно,

пользуясь математикой, т. е. просто следуя определенным правилам, не имеющим никакого отношения к тому, что происходит в действительности. Включение и выключение переключателей в вычислительной машине ничем не напоминает того, что в действительности происходит в природе.

Один из самых важных моментов в этой последовательности «догадка — вычисление следствий — сравнение с результатами экспериментов» заключается в том, чтобы знать, где вы правы. Об этом можно догадываться гораздо раньше, чем рассчитаны все следствия. Истину можно узнать по простоте и изяществу. Чаще всего узнать, правильна ваша догадка или нет, нетрудно уже после двух-трех элементарных расчетов, позволяющих убедиться в том, что она не очевидно неправильна. Если вам повезло, это сразу бросается в глаза (по крайней мере если у вас есть опыт), так как чаще всего приходится не столько добавлять, сколько отбрасывать. Ваша догадка, в сущности, состоит в том, что нечто — очень простое. Если вы не видите сразу же, что это неверно, и если так оказывается проще, чем раньше,— значит, это верно. Правда, простые теории предлагают и неопытные люди или безудержные фантазеры, но здесь сразу ясно, что они неверны, так что это в счет не идет. Другие же, например неопытные студенты, высказывают очень сложные догадки, и им кажется, что все правильно, но я знаю, что это не так, ибо истина всегда оказывается проще, чем можно было бы предположить. Что нам действительно нужно, так это воображение, но воображение в надежной смирительной рубашке. Нам нужно найти новую точку зрения на мир, которая должна согласоваться со всем, что уже известно, но кое в чем расходиться с нашими установившимися представлениями, иначе это будет не интересно. И расхождения должны соответствовать тому, что происходит в природе. Если вам удастся придумать точку зрения на мир, которая согласуется со всем тем, что уже выяснено, и приводит где-то к другим результатам в сомнительных областях, вы делаете великое открытие. Найти же теорию, которая согласуется с экспериментом, где справедливость существующих теорий уже установлена и в то же время приводит в других областях к каким-то новым выводам, даже если они не согласуются с результатами эксперимента, почти невозможно. Но только почти. Новые идеи придумывать очень трудно. Для этого требуется совершенно исключительное воображение.

Что же можно сказать о будущем этого увлекательного приключения? Чем же все это кончится? Мы угадываем все

новые и новые законы. Сколько же их будет, в конце концов, этих новых законов? Не знаю. Некоторые из моих коллег говорят, что этот основной аспект нашей науки сохранится всегда. Но мне кажется, что трудно рассчитывать на постоянную смену старого новым, скажем в течение ближайших 1000 лет. Не может быть, чтобы это движение вперед продолжалось вечно и чтобы мы могли открывать все новые и новые законы. Ведь если бы это было так, то нам быстро надоело бы все это бесконечное наслоение знаний. Мне кажется, что в будущем произойдет одно из двух. Либо мы узнаем все законы, т. е. мы будем знать достаточно законов, чтобы делать все необходимые выводы, а они всегда будут согласоваться с экспериментом, на чем наше движение вперед закончится. Либо окажется, что проводить новые эксперименты все труднее и труднее, и все дороже и дороже, так что мы будем знать о 99,9% всех явлений, но всегда будут такие явления, которые только что открыты, которые очень трудно наблюдать и которые расходятся с существующими теориями, а как только вам удалось объяснить одно из них, возникает новое, и весь этот процесс становится все более медленным и все менее интересным. Так выглядит другой вариант конца. Но мне кажется, что так или иначе, но конец должен быть.

Нам необыкновенно повезло, что мы живем в век, когда еще можно делать открытия. Это как открытие Америки, которую открывают раз и навсегда. Век, в который мы живем, это век открытия основных законов природы, и это время уже никогда не повторится. Это удивительное время, время волнений и восторгов, но этому наступит конец. Конечно, в будущем интересы будут совсем другими. Тогда будут интересоваться взаимосвязями между явлениями разных уровней — биологическими и т. п. или, если речь идет об открытиях, исследованием других планет, но все равно это не будет тем же, что мы делаем сейчас.

Кроме того, в конце концов наступит время, когда все станет известным или дальнейший поиск окажется очень нудным, и тогда сами собой замолкнут кипучие споры по основным вопросам философии физики и исчезнет забота о тщательном обосновании всех тех принципов, о которых мы беседовали в этих лекциях. Наступит время философов, которые до этого стояли в стороне, делая лишь время от времени критические замечания. Тогда нам не удастся уже оттереть их, сказав: «Если бы вы были правы, нам удалось бы сразу открыть все остальные законы». Ведь как только все законы станут известны, они смогут придумать для них

объяснение. Например, всегда находится объяснение трехмерности нашего мира. Ведь у нас всего один мир, и трудно сказать, верно это объяснение или нет, так что, если бы все было известно, наверняка нашлось бы какое-то объяснение, почему эти законы верны. Но это объяснение уже нельзя будет критиковать за то, что оно не дает нам двигаться дальше. Наступит время вырождения идей, вырождение того же сорта, которое знакомо географу — первооткрывателю, узнавшему, что по его следам двинулись полчища туристов.

В наши дни мы испытываем радость, огромную радость от того, что можем предвидеть, как будет вести себя природа в новых, еще никому не ведомых условиях. Эксперименты и информация об определенной области позволяют нам догадываться, что же произойдет в других, еще никем не исследованных районах. Между прочим, эти догадки очень часто совершенно отличны от того, что мы привыкли наблюдать, а для таких догадок требуется светлая голова.

Так чем же можно объяснить такую возможность? Почему природа позволяет нам по наблюдениям за одной ее частью догадываться о том, что происходит повсюду? Конечно, это не научный вопрос; я не знаю, как на него правильно ответить, и отвечу столь же ненаучно: мне кажется, причина в том, что природа проста, а потому прекрасна.

# СОДЕРЖАНИЕ



*Ричард Фейнман*
**ХАРАКТЕР ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ**

Серия «Библиотечка «Квант», вып. 62

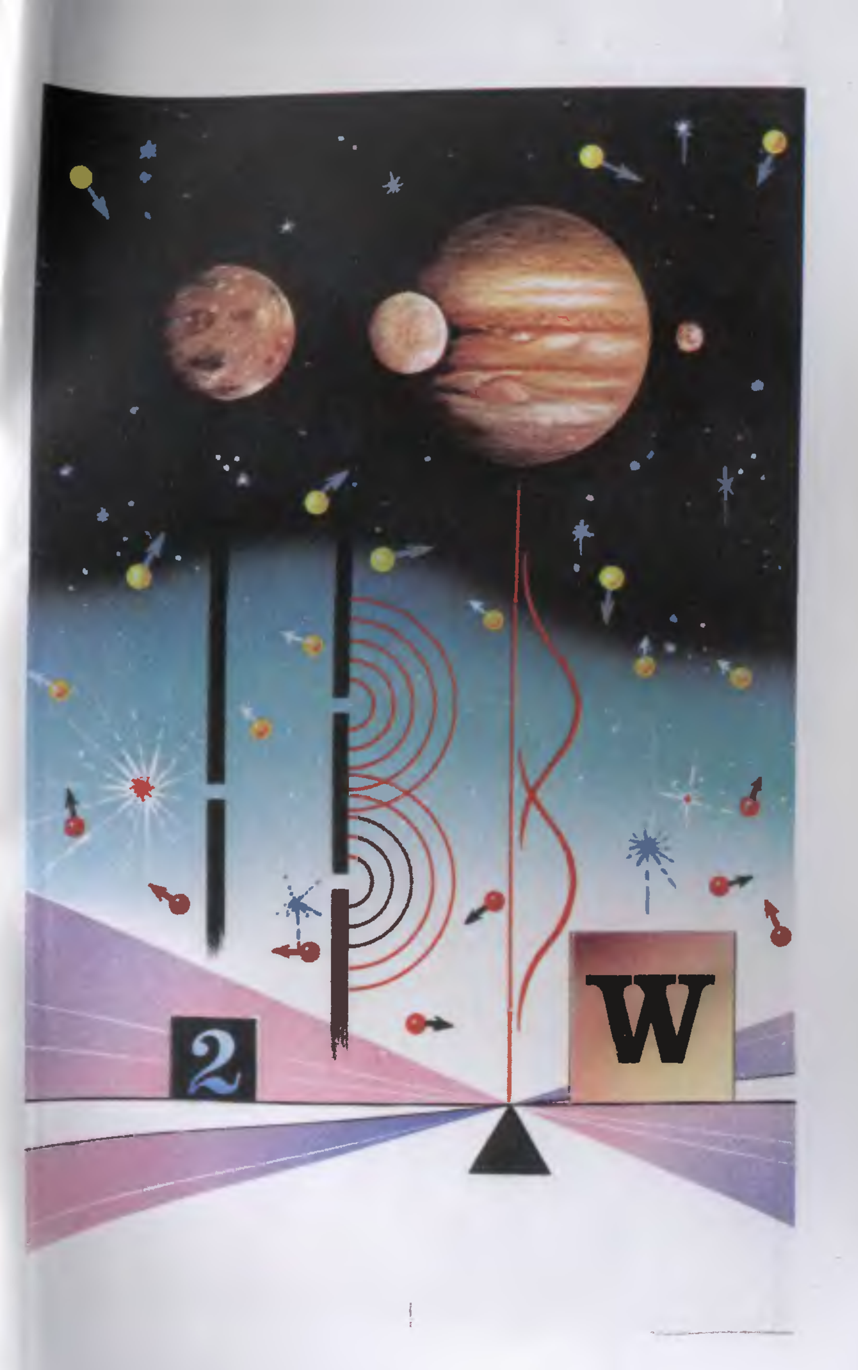
Редактор *Л. А. Панюшкина*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Технический редактор *Л. В. Лихачева*
Корректоры *Л. И. Назарова, Н. Б. Румянцева*

ИБ № 32495

Сдано в набор 08.01.87. Подписано к печати 16.07.87. Формат 84×108/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 8,4 Усл. кр.-отт. 8,82. Уч.-изд. л. 9,15. Тираж 163000 экз., Заказ № 95 Цена 45 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 113054 Москва , Валовая, 28


2
W

45 коп.

